



## 저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#) 

공 학 석 사 학 위 논 문

프로세스 네트워크를 활용한 논  
생태수문 복잡계 분석  
ANALYSIS OF  
ECOHYDROLOGICAL  
COMPLEX SYSTEMS OF RICE  
PADDIES USING PROCESS  
NETWORK

2015년 2월

서울대학교 대학원  
생태조경·지역시스템공학부  
지역시스템공학전공  
윤 주 열

# 프로세스 네트워크를 활용한 논의 생태수문 복잡계 분석

## ANALYSIS OF ECOHYDROLOGICAL COMPLEX SYSTEMS OF RICE PADDIES USING PROCESS NETWORK

지도교수 김 준

이 논문을 공학석사학위논문으로 제출함

2015년 2월

서울대학교 대학원

생태조경 · 지역시스템공학부

지역시스템공학전공

윤 주 열

윤주열의 석사학위논문을 인준함

2015년 1월

위 원 장  
부 위 원 장  
위 원

李 政宰 (인)  
김 준 (인)  
崔 鎭鎔 (인)

## 국 문 초 록

본 논문에서는 농림생태계의 생태수문계를 복잡계의 관점에서 바라보았을 때, (1) 생태수문계의 구성 요소들이 상호작용을 통해 네트워크를 형성하여 집단행동을 하며, (2) 복잡정교한 정보 처리를 수행하고, (3) 자기-조직화(self-organization) 과정을 통해 적응해 가는 복잡계의 특징들을 볼 수 있을 것이라고 가정하였다. 이러한 가정을 확인하기 위해 최근 제안된 ‘프로세스 네트워크’ 접근방법을 국내의 논에 적용 하였다. 이를 위해 30 분 평균된 에너지 및 물질 플럭스와 기상변수들을 5.2 m 높이의 타워에서 측정하였다. 생태수문계와 관련된 11 개의 변수를 선택하여 분석하였으며, 사용된 변수는 메탄 플럭스( $F_{CH_4}$ ), 총일차생산( $GPP$ ), 현열 플럭스( $H$ ), 잠열 플럭스( $LE$ ), 전천일사( $R_g$ ), 강수량( $Precip$ ), 생태계호흡( $RE$ ), 포차( $VPD$ ), 기온( $T$ ), 지온( $T_s$ ), 기압( $P_a$ ) 이다. 제시된 프로세스 네트워크 그리기의 결과에 따르면, 생태수문계에 관여하는 다양한 시공간 규모의 과정들이 실제로 관련 변수들 간의 피드백과 정보 흐름의 네트워크를 형성하고 있음을 명확히 보여준다. 또한 구성 변수들이 독특한 형태(즉, 차별화된 결합 형태, 방향성 및 시간 지연 규모)로 정보를 교환함으로써, 네트워크 내부에 또 다른 네트워크를 형성하며 일관되게 조직화되어 특정한 하부계들을 구성하는 계층적(hierarchical) 구조를 나타낸다. 확인된 하부계들은 종관 하부계(synoptic subsystem, SS), 대기경계층 하부계(atmospheric boundary layer subsystem, ABL), 생물리 하부계(biophysical subsystem, BPS), 생물리화학 하부계(biophysicochemical subsystem, BPCS) 등으로 다양하게 나타났다. 주목할 점은, 이러한 하부계들이 서로 피드백 고리들을 맺거나 끊음으로써 지역 하부계(regional subsystem, RS)와 같은

새로운 하부계의 집합체를 생성하거나, 또는 분리시키는 것이다. 이러한 과정은 바로 복잡계의 특성인 자기-조직화 과정의 증거로서, 생태계가 계층적으로 조직화되어 자연적/인위적 교란 속에서도 자기-조직화를 통해 변화에 적응해 나감을 의미한다. 생태계의 건전성은 시스템의 자기-조직화 과정들이 유지될 때에 비로소 보존된다고 보기 때문에, 이러한 관점에서 프로세스 네트워크 접근법은 지속가능성에 대한 새로운 방법을 제시할 것으로 기대된다.

**주요어:** 프로세스 네트워크, 복잡계, 생태수문계, 정보 이론, 피드백, 자기-조직화, 에디 공분산

**학 번:** 2011-23518

# 목 차

국문초록 .....	I
목 차 .....	III
List of Tables.....	VI
List of Figures .....	VIII
제 1 장 서 론 .....	1
제 2 장 연 구 배 경 .....	4
제 3 장 연구방법 .....	8
3.1 실험개요.....	8
3.1.1 관측지 정보 .....	8
3.1.2 관측 방법.....	11
3.2 자료처리.....	13
3.2.1 좌표보정 .....	15
3.2.2 수증기보정 .....	17
3.2.3 주파수보정 .....	18
3.2.4 공기밀도보정 .....	20
3.2.5 분광보정 .....	21
3.2.6 QC 자료처리 .....	23

3.2.6.1 QC flag.....	23
3.2.6.2 튀는 자료 제거.....	26
3.2.7 빈 자료 메우기 .....	28
<b>3.3 프로세스 네트워크 분석 .....</b>	<b>31</b>
3.3.1 변수선정 .....	34
3.3.2 시간규모와 자료의 선처리.....	37
3.3.3 확률밀도추정 .....	40
3.3.4 상호정보와 이전엔트로피계산.....	42
3.3.5 Threshold 값 .....	45
3.3.6 동기화비 .....	47
3.3.7 네트워크행렬 .....	49
3.3.8 프로세스 네트워크 그리기.....	55
<b>제 4 장 결과 및 고찰.....</b>	<b>57</b>
<b>4.1 관측자료.....</b>	<b>57</b>
4.1.1 미기상학적 환경 .....	57
4.1.2 맥스펙트럼 분석 .....	59
4.1.3 메탄 농도 및 플럭스 시계열 .....	61
4.1.4 메탄 플럭스 보정 결과.....	63
<b>4.2 프로세스 네트워크 분석 결과.....</b>	<b>66</b>

4.2.1 정규 결합 형태 .....	66
4.2.2 프로세스 네트워크 그림 .....	70
4.3 프로세스 네트워크의 함축적 의미 .....	76
제 5 장 결론 및 요약.....	79
References .....	82
부    록.....	91
Abstract .....	115



# List of Tables

Table 1 Data quality control standards.....	24
Table 2 List of Variables.....	35
Table 3 Characteristic of 5 periods in Gimje sites at 2011. Precipitation conditions are represented as total amount of rainfall (mm) / number of rainy days / maximum rain intensity (mm day <sup>-1</sup> ).....	36
Table 4 Logical criteria for coupling type classification (Ruddell and Kumar, 2009). .....	48
Table 5 Mutual information of period 3 in Gimje rice paddy. Source variable index X is in rows; sink variable index Y is in columns.....	51
Table 6 Relative mutual information of period 3 in Gimje rice paddy. The percentage of uncertainty of each sink explained by source. Source variable index X is in rows; sink variable index Y is in columns.....	52
Table 7 The ratio of the maximum lag T to mutual information for all significant couplings of period 3 in Gimje rice paddy. Source variable index X is in rows; sink variable index Y is in columns.....	53

Table 8 The time lags of significant information flow in the interval, Significant lags times are [first–last, (number), max] of period 3 in Gimje rice paddy. Source variable index X is in rows; sink variable index Y is in columns..... 54

Table 9 Phenology, hydrological conditions, plant area index (PAI), mean air temperature, gap–filling rate, and the presences of the basic and aggregated subsystems for five selected periods in 2011 in Gimje rice paddy site in Korea (GRK). Hydrological conditions are represented as total amount of rainfall (mm) / number of rainy days / maximum rain intensity (mm day<sup>-1</sup>). SS stands for synoptic subsystem, BPS biophysical subsystem, BPCS biophysicochemical subsystem, and RS regional subsystem. .... 78

# List of Figures

1		
2	Figure 1 The rice paddy site with the eddy covariance system in	
3	Gimje, Korea. ....	10
4	Figure 2 Flux tower in Gimje rice paddy.....	12
5	Figure 3 Flow chart of Methane flux data processing. ....	14
6	Figure 4 Marginal distribution sampling results: (a) before	
7	planting and (b) after planting. The planting date was Jun-21.	
8	.....	30
9	Figure 5 Flow chart for constructing process networks. ....	33
10	Figure 6 Illustration of the original data time series and	
11	transformed 5 day periodic anomaly time series for LE and NEE.	
12	The anomaly removes the diurnal cycle, rendering each variable	
13	as a departure from the norm .....	39
14	Figure 7 Estimation issues for transfer entropy. (a) Normalized	
15	transfer entropy of number of bins using 1400 data. (b) Same as	
16	(a) but for number of data using 11 bins.....	41
17	Figure 8 Results of transfer entropy and linear cross correlation	
18	for a synthetic system of two logistic maps at a time lag of 1 for	
19	the $X_t > Y_t$ coupling and a time lag of 7 for the $Y_t > X_t$ coupling.	
20	.....	44
21	Figure 9 Changes in threshold value with Monte-Carlo iteration.	
22	.....	46

23	Figure 10 Daily variations of (a) surface energy fluxes, (b) soil	
24	temperature and air temperature, and (c) atmospheric pressure	
25	in Gimje rice paddy site in September 2011.....	58
26	Figure 11 (a) Normalized power spectra of vertical wind velocity,	
27	$w$ , methane density, $m$ , and air temperature, $T$ and (b) normalized	
28	cospectra of covariances, $\overline{w'c'}$ and $\overline{w'T'}$ on 2 September	
29	2011. Red lines mean gradient.....	60
30	Figure 12 Daily variation of (a) methane concentration and (b)	
31	methane flux. The bottom line represents the background	
32	concentration ( $\sim 1,929$ ppb) measured by Kore Meteorological	
33	Administration.....	62
34	Figure 13 Diurnal variations of (a) $\text{CH}_4$ flux, (b) the amount of	
35	corrections, and (c) the ratio of individual correction to total flux	
36	prior to transplanting (1 Sep, 2011).....	65
37	Figure 14 Canonical type of coupling about $T_Z$ lag in Gimje rice	
38	paddy. Variables are given in the script. Solid lines are $T_Z$ lags	
39	and dotted line are significance thresholds, above which	
40	information flux coupling is statistically significant.....	69
41	Figure 15 The process network for third period in 2011, a grain	
42	filling state. Types 1, 2, and 3 relationships result in the	
43	interpretation of the system with two subsystems. Line arrows	
44	represent type 3 couplings, dotted lines represent type 2	
45	coupling.....	75

생태수문계를 복잡계(complex systems)의 관점에서 바라 보려는  
시도가 이루어지고 있다. 복잡계란 계를 구성하고 있는 요소들이  
상호작용을 통해 네트워크를 형성하여 집단 행동을 하며, 복잡  
정교한 정보 처리 수행과 자기-조직화(self-organizing) 과정을  
통해 변화에 적응, 진화해 가는 시스템을 말한다(Mitchell, 2009).  
생태수문계는 유역단위에서 수문계와 생태계의 상호작용으로  
이루어진 계이다(UNESCO 2004). 다양한 생물리 및 생지화학  
과정들이 계층적(hierarchical) 구조를 이루어 역동적으로 환경  
변화에 반응하며 또 적응해가는 생태수문계는 복잡한, 열린  
소산계(open dissipative system)로 볼 수 있다(Kumar, 2007;  
Ruddell and Kumar, 2009a). 열린 계는 고립되거나 닫힌 계와는  
달리, 주변 환경과 물질, 에너지 및 정보의 교환이 함께  
일어난다(Jørgensen et al., 2011). 즉, 생태수문계를 구성하는 여러  
요소들이 상호작용을 통해 다양한 과정들(processes)에 관여하고,  
이들이 서로 연결되어 네트워크 구조를 이루며, 정보의 교환을 통해  
네트워크의 내부 구조를 조직화함으로써 생태수문계의  
거시적인(macroscopic) 상태를 결정하게 된다. 이러한 변화에  
적응해가는 생태수문계의 상태를 정량화하고 그 변화 과정을

65 이해하기 위해서는 상호작용의 타입, 방향성 및 시공간 규모에 대한  
66 구체적인 정보가 필요하다.

67 이 연구의 목적은 생태수문계의 상태를 정량적으로 나타내기  
68 위해서 (1) 복잡계의 관점에서 접근하는 ‘프로세스 네트워크’  
69 연구방법을 소개하고, (2) 이 방법의 적용성을 사례분석을 통해  
70 제시하고자 한다. 이를 통해 자연적/인위적 교란에 따라 변화하는  
71 논의 생태수문계의 상태가 다양한 프로세스 네트워크로 표현될 수  
72 있음을 실제로 관측한 자료의 분석을 통해 보이고자 하였다. 이를  
73 위해 먼저 Korea Flux Monitoring Network (KoFlux)의 하나인  
74 김제 논 관측 타워(GRK)에서 생태수문계를 나타내는 주요  
75 변수들을 선정하였다. 예를 들어, 메탄 플럭스, 이산화탄소 플럭스,  
76 현열 플럭스, 증발산, 기타 기상변수 등을 포함하여 총 11 개의  
77 변수를 실제로 관측하였고, KoFlux 표준화 과정을 통해 자료처리를  
78 수행하였다. 품질 관리를 거쳐서 만들어진 최종 시계열 자료를  
79 이용해 프로세스 네트워크 접근법에 따라 생태수문계의 프로세스  
80 네트워크를 그려내는 과정을 단계별로 정리하였고 각각의  
81 사례분석을 문서화하였다.

82 본 논문의 구성은 다음과 같다. ‘서론’ 및 ‘연구배경’에서는  
83 법칙뿐만 아니라 과정을 중시하는 복잡계 관점의 패러다임 전환과  
84 프로세스 네트워크 연구 방법론을 제시하게 된 배경 및 연구

85    목적을 간략히 소개하였다. ‘연구방법’에서는 프로세스 네트워크  
86    연구방법의 기본 원리, 계산 절차 및 프로세스 네트워크 묘사  
87    방법을 요약하여 설명하였다. 또한 관측지에 대한 소개와  
88    에디공분산 자료의 처리 방법 등을 간략히 설명하였다. ‘결과 및  
89    토의’에서는 실제 사례를 들어, 네트워크    그려내고, 결과 및  
90    관련된 질문들을 통해 함축적 의미를 살펴보았으며, KoFlux 표준화  
91    과정을 통해 처리된 CH<sub>4</sub> 플럭스 관측 자료를 제시하였다. 더불어,  
92    다양한 조건의 5 개 기간을 선정하여 각 기간의 생태수문계의  
93    상태와 프로세스 네트워크의 하부계들의 특징 및 자기-조직화 관련  
94    정보를 요약하여 제시하였다.

96       최근에 들어서, 프로세스 네트워크(process networks) 분석을  
 97       통해 복잡계의 상태를 이상적으로 잘 나타낼 수 있음이 제안되었다.  
 98       여기서 프로세스 네트워크란 서로 다른 요소들 간의 물질, 에너지  
 99       및 정보의 흐름의 크기와 방향을 나타내는 피드백 고리들(feedback  
 100       loops)과 이와 관련된 시간 규모들의 네트워크를 뜻한다(Ruddell  
 101       and Kumar, 2009a). 이 프로세스 네트워크 접근법의 특징은  
 102       강제(forcing)와 피드백의 상호결합으로 인해 발생하는 계의  
 103       창발적(emergent) 특성을 그려내기 때문에, 상황에 따라 계의  
 104       구조와 상태가 어떻게 반응하고 적응하는지를 보여줄 수 있다는  
 105       점이다. 실제로, Ruddell and Kumar (2009a)는 미국 중서부 지역의  
 106       옥수수-콩밭의 미기상학적 관측 자료를 이용하여 각 성장 기간의  
 107       생태수문계의 상태와 자기-조직화 과정을 그림으로 나타내어  
 108       프로세스 네트워크 분석의 유효성을 보여주었다. Yun et al. (2014a,  
 109       b)은 프로세스 네트워크 접근법을 온대 활엽수림의 생태수문계에  
 110       적용하여, 여름 몬순 기간동안 장마 발생에 따라 생태수문계의  
 111       상태가 변화할 뿐 아니라, 자기-조직화 과정을 통해 정보 흐름의  
 112       결합 형태, 방향과 크기, 그리고 관련 시간 규모가 달라짐을 보였다.  
 113       더불어 이러한 자기-조직화 과정이 유지되어야만 생태계의



114    건전성이 유지되고 궁극적으로 지속가능한 관리가 가능해질 수  
115    있음을 지적하였다.

116    이러한 복잡한 생태수문계를 바로 이해하기 위해서는 다양한  
117    시공간 규모의 현상을 정량적으로 분석가능하게 할 고품질의  
118    관측자료가 필요하며, 이에 합당한 관측기술이 필요하다. 에디  
119    공분산(eddy covariance) 관측기술은 식생을 포함한 지표와 대기  
120    간에 교환되는 물리량의 연직 플럭스를 정량화하고 그 교환  
121    과정에서 중요한 역할을 담당하는 다양한 규모의 난류의 구조를  
122    이해하는데 사용되는 미기상학적 방법으로서, 물리학의 보존법칙을  
123    근간으로 한다(Baldocchi, 2003). 이 관측 기술은 풍하측에 일정  
124    높이의 타워를 세워 고속반응 기기들을 설치하되 비교적 넓은  
125    면적( $10^1 \sim 10^5 \text{ m}^2$ )을 대변할 수 있는 적절한 높이에서 물질(물,  
126    이산화탄소, 메탄 등)과 에너지의 플럭스를 고속으로 관측할 뿐  
127    아니라 자료를 집록하여 자료의 후처리를 가능하게 한다. 관측  
128    대상지를 불어 오는 바람을 대상으로하는 이 기술은 관측지에  
129    직접적인 피해를 주지 않으면서도 지속적인 연속 관측을 가능하게  
130    한다(Baldocchi, 2003; Kim et al., 2006).

131    논은 대표적인 생태수문계이다. 최근에 논의 생태수문순환과  
132    관련한 온실가스 배출량 산정을 위한 연구가 진행되고 있다(Bae et  
133    al., 2013). 이러한 연구의 일환으로 에디공분산 방법을 이용한

134 메탄( $\text{CH}_4$ ) 관측이 수행되고 있다(Wille et al., 2008; McDermitt et  
135 al., 2011; Baldocchi et al., 2012; Iwata et al., 2014; Kang et al.,  
136 2014b).  $\text{CH}_4$  는 이산화탄소( $\text{CO}_2$ )와 함께 대표적인 온실 가스로서  
137 온난화에 미치는 영향력은 이산화탄소의 25 배 이상이다(Forster et  
138 al., 2007). 대기 중  $\text{CH}_4$  농도는 산업화 이전과 비교하여 이미 두  
139 배 이상 증가하였고, 한동안 그 증가 추세가 멈추었다가 최근  
140 들어서 다시 증가하고 있으나, 그 흡원(sink), 발원(source) 및  
141 시간에 따른 가변성의 원인이 여전히 불분명하다(Bousquet et al.,  
142 2006). 따라서  $\text{CH}_4$  농도 및 플럭스의 지속적이고도 체계적인 감시  
143 관측이 요구된다(Baldocchi et al., 2012). 관개된 논은 습지 및  
144 축사와 함께  $\text{CH}_4$  의 대표적인 발원으로써(Wassmann et al., 2000;  
145 IPCC, 2013), 국내 메탄 가스 배출량의 약 23%가 벼 재배에 의한  
146 것으로 보고되어 있다(GIR, 2013).

147       국내에서는 파장가변 다이오드를 활용한 레이저 기반의  
148 고속반응 폐회로(closed-path) 분광기를 활용하여  $\text{CH}_4$  농도의  
149 프로파일을 관측하거나, 이를 에디 공분산 방법과 접목하여 논,  
150 축사, 또는 매립지에서  $\text{CH}_4$  플럭스를 관측한 연구들이 보고된 바  
151 있다(Kim et al., 2000). 본 연구에서는 실온에서 사용 가능한  
152 개회로(open-path) 파장 변조(wavelength modulation) 분광계와  
153 에디 공분산 방법을 함께 사용하여 관개된 논에서 방출되는  $\text{CH}_4$   
154 플럭스 관측을 수행하였다. 개회로 기체분석기를 사용하여 에디

155 플럭스를 관측할 경우, 자료의 후 처리 과정에서 현열 및 잠열  
156 플럭스의 동시 관측과 더불어 사용 기기의 특성에 따른 보정  
157 과정이 수반된다. 국내에서 플럭스 자료의 후 처리에 사용되고 있는  
158 KoFlux 표준화 프로토콜(Hong et al., 2009; Kang et al., 2014a)은  
159 현열, 잠열 및 CO<sub>2</sub> 플럭스 자료만을 다루고 있으며, CH<sub>4</sub> 플럭스는  
160 현재 포함되어 있지 않았으나 최근 Kang et al.(2014b)은 CH<sub>4</sub>  
161 플럭스의 처리 방법에 관한 연구를 수행하여 표준화 프로토콜을  
162 제시한 바 있다.

## 제 3 장 연 구 방 법

### 3.1 실험개요

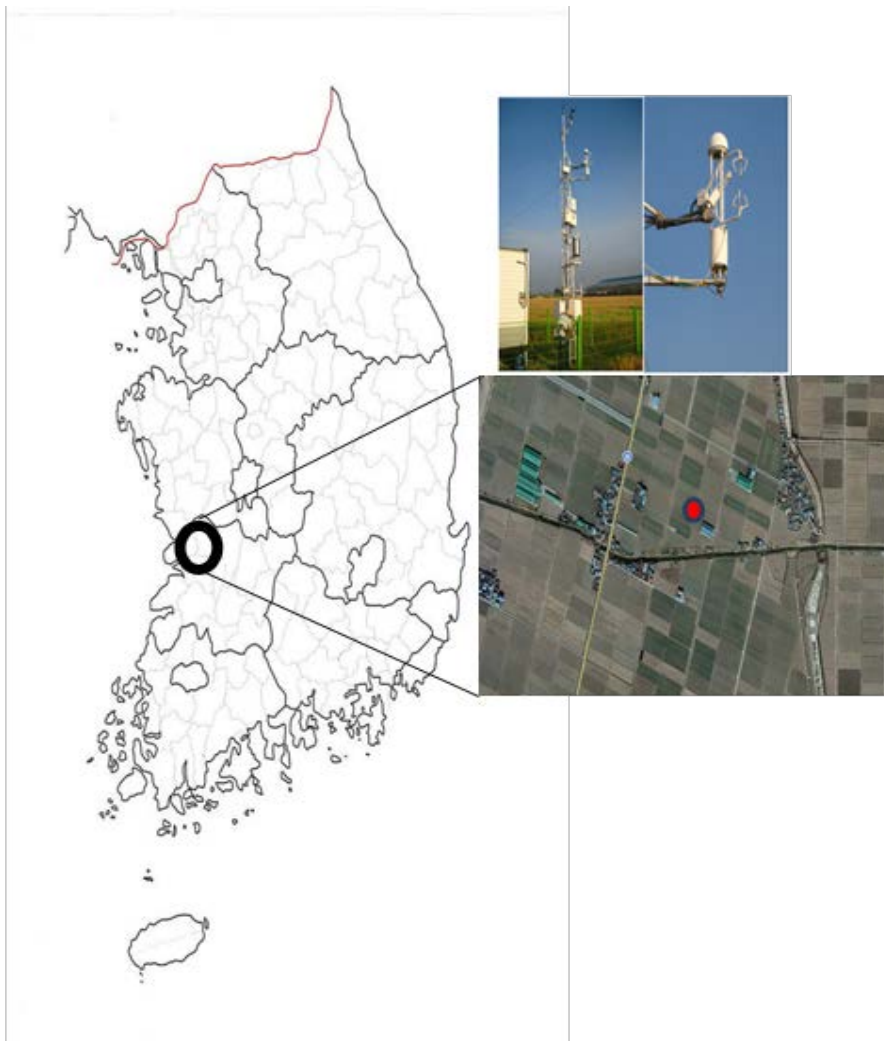
#### 3.1.1 관측지 정보

CH<sub>4</sub> 플럭스 관측을 수행한 실험 장소(35° 44 ' 42 " N, 126° 51 ' 8.8 " E, 해발고도 4.1 m)는 전라북도 김제시 부량면 신용리에 위치한 대표적인 벼-보리 재배지로써 약 20 년이상 운영되어왔으며, 보리 종자 채종포로 약 5 년 전부터 운영되고 있다(Fig. 1). 관측지 주변은 대부분 논으로 이루어져 있어서 균질하며 평탄한 지형이다. AsiaFlux 플럭스 관측망([www.asiaflux.net](http://www.asiaflux.net))에 'GRK' 관측소로 등재되어 있는 플럭스 타워는 논 사이에 구축되어 있다. 플럭스 관측에 영향을 미치는 풍상측 취주거리는 풍향에 따라 다소 차이를 보이나 최소 10 여 m 에서 최대 300 m 정도이다. 관측 타워로부터 남서쪽 방향으로 400 m 떨어진 곳에 소규모 농촌 마을과 지방도로가 위치해 있고 북동쪽으로 300 m 떨어진 곳에 소형 축사가 위치해 있다. 토양통은 물이 잘 빠지는 미사질양토의 전북통이다(Min et al., 2013).

180 실험 포장은 2010 년 10 월에 벼 수확후 영양보리를  
181 17.5kg/10a 로 파종하고 기비로 N-P-K 비료(맞춤 16 호, 22-10-  
182 8 kg/10a)를 50kg/10a 를 시용하였다. 2011 년 3 월 요소로  
183 20kg/10a 를 추비로 시용하였다. 2011 년 6 월 8 일 종자생산용으로  
184 보리를 수확하였으며 보릿짚은 전량 사료용으로 회수 하였다.

185 6 월 13 일에 논에 20cm 정도 깊이로 물을 대고 6 월 13-  
186 14 일에 걸쳐 논갈이를 실시하였다. 6 월 16 일 맞춤 16 호 (22-  
187 10-8, N-P-K kg/10a)로 160kg/10a 로 기비를 처리하고, 6 월  
188 19 일 30×12cm 의 간격으로 온누리(품종) 어린 모를 기계  
189 이앙하였다. 7 월 25 일 벼 뿌리의 활착증진을 위해 중간 물 빼기를  
190 실시하였다. 8 월 19 일 요소 5kg/10a 을 수비로 처리하였고, 8 월  
191 26 일에 물 걸러 대기를 실시하였다. 9 월 26 일 벼 수확을 위한  
192 완전 물 빼기를 실시하였다. 벼의 출수는 8 월 20 일이었고, 벼  
193 수확은 10 월 16 일 이었다. 벳짚은 사료용으로 회수 하였고 10 월  
194 26 일 영양보리를 파종하였다(영양보리, 17.5kg/10a).

195

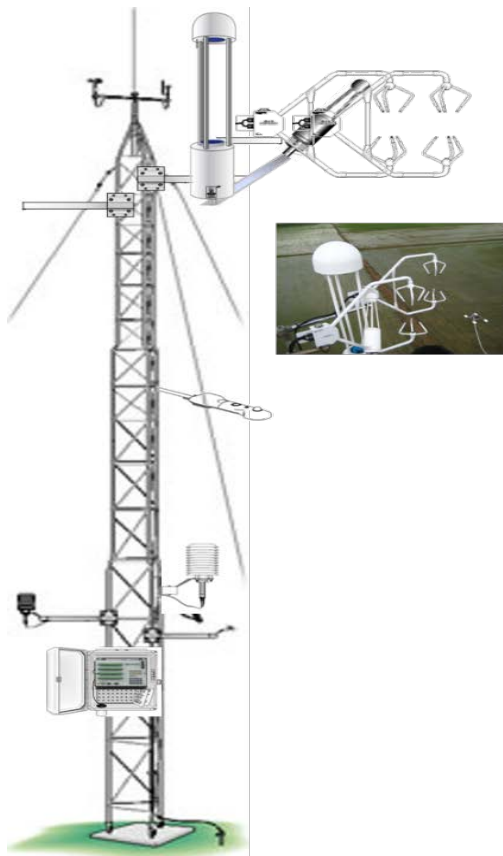


**Figure 1** The rice paddy site with the eddy covariance system in Gimje, Korea

### 197 3.1.2 관측 방법

198        논에서 방출되는  $\text{CH}_4$  플럭스를 측정하기 위해 3 차원 초음파  
199        풍향풍속계(CSAT3, Campbell Scientific Inc., USA)와 파광 변조  
200        분광법을 이용한 고속반응 개회로  $\text{CH}_4$  분석기(LI-7700, LI-COR  
201        Inc., USA)를 지면으로부터 5.2 m 높이에 설치하였다. CSAT3 에서  
202        관측되는 현열 플럭스와 더불어  $\text{CH}_4$  플럭스 보정을 위해 필요한  
203        잠열 플럭스를 관측하기 위해 고속반응 개회로  $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$   
204        분석기(LI-7500, LI-COR Inc., USA)를 같은 높이에 설치하였다.  
205        CSAT3 의 관측 경로 길이(path length)는 0.116 m 이며, 설치  
206        방향은 주 풍향인 서쪽(정북을 기준으로 시계방향 285)을 향하도록  
207        하였다. 개회로 메탄 분석기인 LI-7700 의 물리적인 경로 길이는  
208        0.5 m 이나, 그 광학 경로 길이는 30 m 이다. CSAT3 과 LI-7700 의  
209        수직적인 분리를 최소화하기 위해 각 관측 경로의 중심이 같은  
210        높이에 위치하도록 설치하였다. 두 기기간의 수평적인 분리 거리는  
211        주파수 보정과 공기 흐름의 일그러짐이 모두 최소화될 수 있도록  
212        관측 높이의 약 1/10 인 0.52 m 로 설정하였다. 개회로  $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$   
213        분석기는 경로 길이가 0.125 m 로서, CSAT3 과의 분리 거리는  
214        0.43 m 이었다. 모든 난류 자료의 샘플링 속도는 10 Hz 로  
215        관측되었고, 생자료(raw data)와 30 분 평균 자료를 함께  
216        자료집록기(CR3000, Campbell Scientific Inc., USA)에 저장하였다.

217      미기상 자료의 수집을 위해 순복사계(CNR1, Kipp&Zone B.V.,  
218      Netherlands)와 우량계(52203 Tipping Bucket Rain Gauge, RM  
219      Young Company, USA)를 각각 지면에서 2.7 m 와 1 m 높이에  
220      설치하였다. 또한 토양 온도 센서(TCAV, Campbell Scientific Inc.,  
221      USA)를 지표에서 0.05 m 깊이에 설치하였다. 저속반응 미기상  
222      관측자료들은 5 초 간격으로 측정하였고, 30 분 평균된 자료를  
223      자료집록기(CR5000, Campbell Scientific Inc., USA)에 저장하였다.  
224      에디 공분산 설치 구조 관련하여 다음의 그림(Fig. 2)에  
225      제시되어있다.



**Figure 2** Flux tower in Gimje rice paddy



## 226 3.2 자료처리

227 에디 공분산으로 관측된 플럭스 자료는 관측지의 특성, 기상 조건,  
228 그리고 관측 기기의 설치 구조(관측 높이, 기기간의 분리 거리,  
229 설치 방향 등)에 따라 이상적인 관측 조건에서 벗어날 수 있다.  
230 따라서 이러한 부분들에 대해 여러 단계의 보정을 필요로 한다.  
231 관측된 자료는 KoFlux 표준화 프로토콜에 따라 처리되었다.  
232 KoFlux 표준화 프로토콜은 다음의 그림(Fig. 3)의 순서도에 따라  
233 진행하였다. 플럭스 처리 프로그램은 Licor 에서 제공하는  
234 상용소프트웨어인 EddyPro 를 이용하여 처리하였다(부록 A.1).

235

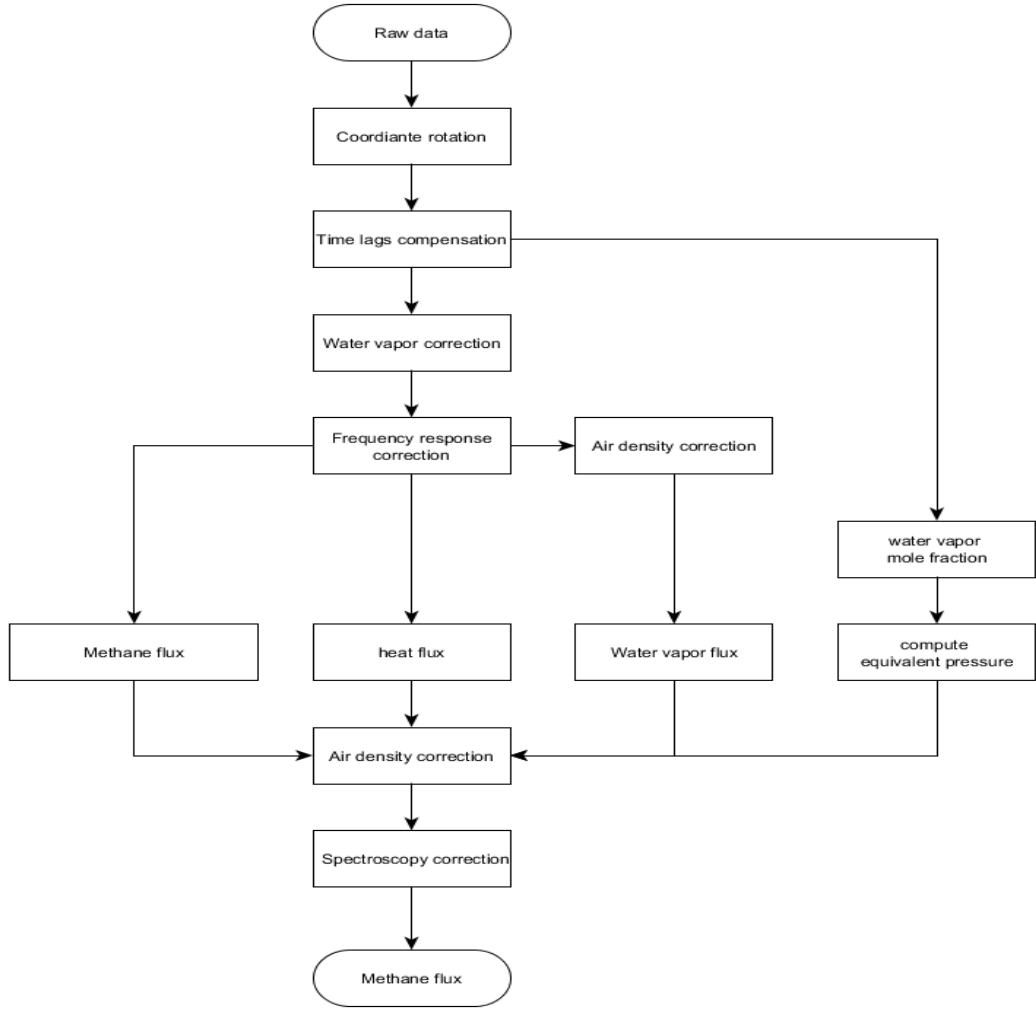


Figure 3 Flow chat of Methane flux data process

### 3.2.1 좌표보정

에디 공분산 방법의 기본 가정 중에 하나는 수평적으로 평탄한 지역 (평균 연직 풍속이 0 이며, 따라서 연직 이류가 없는 상황)에서 관측이 이루어져 한다는 것 (Finnigan et al., 2003)이다. 하지만 실체는 이러한 가정을 만족하지 못하므로 이에 대한 교정이 필요하다. 일반적으로 풍향풍속에 대한 교정방법은 이중회전(double rotation)과 평면 맞추기 회전(planar fit roataion)이 사용된다. 이중 회전은 충분히 균질하고 평탄한 곳에 적용을 하는 반면, 산악같이 복잡지형의 경우 평면 맞추기 회전을 적용한다. 김제의 경우, 논으로 균질하고 평탄한 지역이므로 이중 회전을 적용하였다.

10 Hz 자료를 30 분 평균자료로 계산하기 전 연직 평균 풍속과, 측면 평균 풍속을 0 으로 만들어 주어야 한다. 첫번째 회전에서 측정된 바람벡터( $\overline{u_m} \equiv (u_m, v_m, w_m)$ )를 측면 바람( $v_m$ )을 0 으로 만들어주기 위해 회전각  $\theta$ 을 사용하여 z축에 대해서 회전시킨다. 이 과정은 아래의 식과 같다.

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{v_m}{u_m}\right) \quad (1)$$

$$u_{imp} = u_m \cos \theta + v_m \sin \theta \quad (2)$$

$$v_{imp} = -u_m \sin \theta + v_m \cos \theta \quad (3)$$

$$w_{imp} = w_m \quad (4)$$

두번째 회전은 연직 바람( $w_m$ )을 0 으로 만들어주기 위해 새로운 y축에 대해서 회전각  $\phi$ 로 회전한다.

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{w_{imp}}{u_{imp}}\right) \quad (5)$$

$$u_{rot} = u_{imp} \cos \phi + w_{imp} \sin \phi \quad (6)$$

$$u_{rot} = v_{imp} \quad (7)$$

$$w_{rot} = -u_{imp} \sin \phi + w_{imp} \cos \phi \quad (8)$$

이중 회전이 적용된 바람 벡터  $\overrightarrow{u_{rot}} \equiv (u_{rot}, v_{rot}, w_{rot})$  는 측면 풍속( $v$ )과 연직 풍속( $w$ )이 0 이된다. 모든 회전이 적용된  $u$  는 30 분간격의 평균 풍속이 된다.

### 3.2.2 수증기보정

현열 플럭스를 관측하기 위해서는 빠른 속도 (e.g., 10 Hz) 로 관측한 기온자료가 필요하다. 미세 열전대의 경우, 이러한 관측이 가능하지만 내구성이 약하기 때문에 장기간 관측에는 적합하지 않다. 그래서 대신 사용하는 것이 초음파 풍향 풍속계에서 음파 속도를 이용해 관측된 소닉 온도이다. 음파 속도는 다음과 같은 식에 의해 결정된다(Cambell, 2010).

$$T_s = \frac{c^2}{\gamma_d R_d} - 273.15 \quad (9)$$

여기서  $T_s$  는 음파 온도(°C),  $\gamma_d$  는 일정한 부피에 대해 일정한 압력에서의 습윤공기의 비열비, 그리고  $R_d$  는 건조공기의 기체상수(  $287.04 \text{ JK}^{-1}\text{Kg}^{-1}$  )이다. 식 (9)에서 보듯이 음파온도는 비습의 영향을 받기 때문에 다음과 같이 비습에 대한 보정이 필요하다(Burba, 2013).

$$T \approx \frac{T_s}{1+0.51q} \quad (10)$$

여기서  $q$ 는 상대습도이다. 보정된 음파 온도를 이용해 30 분 평균된 현열 플럭스를 계산하게 된다.

### 3.2.3 주파수보정

고속반응 기기를 이용한 난류 플럭스의 집록과 분석은 (1) 기기 자체의 경로 길이와 (2) 흐름과 풍향 풍속계와 스칼라 관측기기간의 물리적인 분리 거리로 인해서 충분한 영역의 주파수 반응을 반영하지 못하게 되어 특정 주파수 영역에서 플럭스의 손실이 생길 수 있다(Choi et al., 1999). 이러한 기기 고유의 특성과 관측 장비의 설치 구조에 따른 불충분한 주파수 반응으로 인해 과소평가되는 플럭스는 다음과 같이 나타낼 수 있다(Moncrieff et al., 1997).

$$\frac{\Delta F_m}{F_m} = 1 - \frac{\int_0^\infty CO_{F_m}(n) \cdot T_{all}(n) dn}{\int_0^\infty CO_{F_m}(n) dn} \quad (11)$$

여기서  $\Delta F_m$ 는  $CH_4$  플럭스  $F_m$ 의 손실량,  $CO_{F_m}(n)$ 은  $CH_4$  플럭스의 각 자연 주파수 ( $n: s^{-1}$ )에 해당하는 코스펙트럼,  $T_{all}(n)$ 은 코스펙트럼의 전달 함수이다.  $T_{all}(n)$ 은 주파수 손실의 원인에 따라 달라지게 되는데 주요 원인으로는 반응 시간, 스칼라 경로 평균, 기기 분리, 저주파 통과 필터링(low pass filtering)과 고주파 통과 필터링(high pass filtering)이 있다. 이러한 원인들을 고려한  $T_{all}(n)$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다(Burba, 2013):

$$T_{all}(n) = T_{\tau_m} \cdot T_{\tau_w}(n) \cdot T_s(n) \cdot [T_{hi} \cdot T_{lo}(n)]^2 \cdot \sqrt{T_{sp}(n)} \quad (12)$$

여기서  $T_{tm}$  와  $T_{tw}$  는 각각 두 신호(즉 메탄 농도와 연직 풍속)의 반응 시간에 대한 전달함수,  $T_s$  는 기기 분리에 따른 전달함수,  $T_{hi}$  와  $T_{lo}$  는 각각 저주파 및 고주파 통과 필터링에 대한 전달함수이며,  $T_{sp}$  는 스칼라 경로에 대한 전달함수이다. 각 전달함수의 구체적인 관계식은 Burba (2013)에서 찾아 볼 수 있다. 이 중에서 특별히 관측 기기를 설치할 때에 유의해야 하는 기기간 분리에 대한 전달함수,  $T_s$ 를 살펴보면,

$$T_s(n) = e^{-9.9(n \cdot p_{xy} / \bar{u})^{1.5}} \quad (13)$$

여기서  $p_{xy}$  는 기기간 분리 거리( m )이며,  $\bar{u}$  는 평균 수평 풍속(  $\text{m s}^{-1}$  )이다. 식(3)에 의하면 같은 조건에서 주파수 영역이 낮아질수록, 기기간 분리 거리가 커질수록, 그리고 풍속이 낮아질수록 주파수 반응 손실이 증가함을 알 수 있다. 예를 들어, 1 Hz 의 주파수 영역에서 풍속이  $2 \text{ m s}^{-1}$  일때, 기기간 분리 거리가 0.1 m 에서 0.5 m 로 늘어나게 되면 전달 함수는 0.591 에서 0.003 으로 빠르게 지수적으로 감소하여 식(1)과 (2)에서  $\Delta F_m$ , 즉  $\text{CH}_4$  플럭스의 손실량이 증가하게 된다. 또는 기기간의 분리 거리가 0.5 m 일 때, 풍속이  $1 \text{ m s}^{-1}$ 에서  $3 \text{ m s}^{-1}$ 로 증가하면 전달 함수는 0.03 에서 0.51 로 지수적으로 증가하여 손실량은 반대로 감소하게 된다. 따라서 에디 공분산 기기를 타워에 설치할 때에는 이러한 보정 과정을 고려하여 설치 높이와 기기간 분리 거리를 미리

최적화함으로써 자료의 후처리 과정에서 보정량을 사전에 최소화시키는 것이 바람직하다.

### 3.2.4 공기밀도보정

관측된  $\text{CH}_4$  플럭스의 경우, 현열 및 잠열 플럭스의 동시 수송으로 인한 공기 밀도의 변동이 발생한다. 이러한 밀도 변동은 미세한 평균 연직 풍속(즉,  $\bar{w} \neq 0$ )을 만들어내어 이에 수반되는 추가적인 플럭스를 고려해 주어야 한다. 이에 대한 보정식은 아래와 같다(Webb et al., 1980):

$$F_{mc} = \overline{w'm'} + \mu \frac{\bar{m}}{\bar{\rho}_d} \overline{w'q'} + (1 + \mu\sigma) \frac{\bar{m}}{\bar{T}} \overline{w'T'} \quad (14)$$

여기서  $F_{mc}$ 는 보정된  $\text{CH}_4$  플럭스( $\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ),  $\overline{w'm'}$ 는 주파수 보정까지만 적용된  $\text{CH}_4$  플럭스( $\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ),  $\mu$ 는 건조 공기 대 수증기의 몰 질량비,  $\bar{m}$ 는  $\text{CH}_4$ 의 평균 밀도( $\text{mg m}^{-3}$ ),  $\bar{\rho}_d$ 는 건조 공기의 평균 밀도( $\text{g m}^{-3}$ ),  $\overline{w'q'}$ 는 수증기 플럭스( $\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ),  $\sigma$ 는 수증기 대 건조 공기의 밀도비,  $\bar{T}$ 는 평균 기온(K),  $\overline{w'T'}$ 는 열 플럭스( $\text{K m h}^{-1}$ )이다. 여기서는 정압의 변동에 의한 효과(Massman and Tuovinen, 2006; LI-COR Inc., 2013)는 고려하지 않았다(Iwata et al., 2014). 식(4)에 따르면 기온과  $\text{CH}_4$  농도가



일정할 때 공기 밀도 변동에 따른 보정은 잠열보다 현열에 민감하게 반응한다. 예를 들어, 잠열 플럭스가  $600 \text{ W m}^{-2}$  이고 현열 플럭스가  $100 \text{ W m}^{-2}$  인 경우 잠열 보정과 현열 보정이 크기가 비슷해 지지만, 반대로 잠열이  $100 \text{ W m}^{-2}$ 이고 현열이  $600 \text{ W m}^{-2}$ 인 경우 잠열 보정보다 현열 보정이 약 6 배정도 크다. 또한 공기 밀도 보정은 잠열과 현열의 크기뿐 아니라 수송 방향에도 영향을 받는다. 예를 들어 잠열이  $100 \text{ W m}^{-2}$  이고 현열이  $-50 \text{ W m}^{-2}$ 이면  $\text{CH}_4$  플럭스는 보정에 의해 감소한다.

### 3.2.5 분광보정

분광 효과란 기온, 수증기, 기압에 따라 기체의 흡수선(absorption line)이 변화하는 것을 말한다. 레이저를 이용하는 개회로 가스 분석기인 LI-7700 은 분광효과를 보정해주어야 정확한 플럭스 측정이 가능하다(McDermitt et al., 2011; LI-COR Inc., 2013). 분광효과를 고려한 보정 식은 아래와 같이 공기 밀도 보정 식(4)에 세 개의 계수들을 추가하여 나타낼 수 있다(McDermitt et al., 2011; LI-COR Inc., 2013).

$$F_{mc} = A \cdot \{\overline{w'm'} + B \cdot \mu \frac{\bar{m}}{\rho_d} \overline{w'q'} + C \cdot (1 + \mu\sigma) \frac{\bar{m}}{\bar{T}} \overline{w'T'}\} \quad (15)$$

여기서  $F_{MC}$ 는 분광 보정이 포함된 최종  $\text{CH}_4$  플럭스이며, 계수  $A, B, C$ 는 다음과 같다(McDermitt et al., 2011; LI-COR Inc., 2013):

$$A = \bar{\kappa} \quad (16)$$

$$B = 1 + (1 - 1.46\bar{x}_v)a_v\bar{P}_e\frac{\kappa_{p_e}}{\bar{\kappa}} \quad (17)$$

$$C = 1 + (1 - \bar{x}_v)\bar{T}\frac{\kappa_T}{\bar{\kappa}} + \bar{x}_v(B - 1) \quad (18)$$

여기서  $\kappa$  ( $=A$ )는 기온, 수증기, 기압의 함수이고,  $x_v$ 는 수증기의 몰분율,  $a_v$  ( $=0.46$ )는  $\text{CH}_4$ 에 대한 수증기의 증가 계수,  $P_e$ 는 등가 압력(kPa),  $\kappa_{p_e}$ 는 일정한 온도에서 등가 압력에 따른  $\kappa$ 의 변화율,  $\kappa_T$ 는 일정한 등가 압력에서 기온에 따른  $\kappa$ 의 변화율이다. 일반적으로  $A$ 는 기온, 수증기, 기압이 증가함에 따라 증가한다. 이때  $A$ 와  $B$ 는 음의 상관관계를 가지는 반면,  $A$ 와  $C$ 는 양의 상관관계를 갖는다. 이러한 관계의 따라  $A, B, C$ 는 기온  $5\sim 40^\circ\text{C}$ , 수증기 몰분율  $0.01\sim 0.05$ , 기압  $95\sim 115\text{ kPa}$  범위에서 각각  $0.94\sim 1.17$ ,  $1.35\sim 1.51$ ,  $1.14\sim 1.41$ 의 값을 가진다(LI-COR Inc., 2013).

## 3.2.6 QC 자료 처리

### 3.2.6.1 QC flag

품질관리 표시는 자료 품질의 수준을 표시한다. 품질관리의 중요한 한가지 목적은 자료 품질에 기초하여 자료에 표시를 붙이는 것이다. 값 자체를 변환하지 않는 자료 품질 표시는 잘못되거나 의심스럽거나 혹은 좋은 자료를 표시하는 데 사용되는 방법이다. 과학적 이유를 위해, 최종 사용자는 자료 품질 표시에 따라 그가 원하는 자료를 선택할 수 있다. KoFlux 자료는 총 4 개의 flag(M: missing data, B: bad data, D: dubious data, G: good data)가 있다(Table 1).

**Table 1** Data quality control standards

	Cases	Remark
M	No measurement	No data were collected in the logger.
	NAN, NA, INF, -6999, 6999, -9999, -99999 etc in the data files	No value in the data file. NAN, NA, INF, -6999, 6999, -9999, -99999
	Discontinuity of data	
B	Out of the range.	(1)
	Known instrument malfunction	Instrument doesn't work well, for example, power is unstable or sensor is out of order.
	Original data were exactly same during some period	Example of wind direction data of 39m 3-cup anemometer
	n_Tot number less than $2/3 \times 18000$ , for flux data from eddy covariance system(3)	n_Tot : Total sampling number during 30min.
	AGC value is not specified, for LI7500	AGC : diagnostic value of LI7500
	irga_warning_Tot larger than $1/3 \times 18000$ for LI7500	
	csat_warning_Tot larger than $1/3 \times 18000$ for Sonic data (u, v, w, Ts)	
D	n_Tot number less than $95\% \times 18000$ , for eddy covariance system(4)	
	Instrument maintenance (cleaning the sensor or calibration)	First, check the field log during that period, in this case data can be have a spike
	Data have suspect Philomena, with a caution	Flag applied when the data look to have obvious errors, but no specific reason for the error can be determined
	irga_warning_Tot larger than $5\% \times 18000$ for LI7500	

	csat_warning_Tot larger than 5%*18000 for Sonic data (u, v, w, Ts)	
	LI7500 and CSAT data during raining	
	Radiation data during raining	
G	Data passed after filtering above all QC flag	

(1) Range test : Based on the variations of the variables during Jul. 2011 ~ Oct. 2014, the reference ranges of these variables for QC are listed in the table.

Variable	unit	range
$\rho_v$	mmol/mol	(0~45)
$\rho_c$	$\mu\text{mol/mol}$	(90~1400)
$\rho_m$	$\mu\text{mol/mol}$	(1.80~11)
U	m/s	(0,20)
Rn	W/m <sup>2</sup>	(-150, 1000)

### 3.2.6.2 튀는 자료 제거

KoFlux 프로그램에서는 30 분 플럭스 자료의 튀는 자료를 제거하기 위해서 FLUXNET 의 표준방법인 연속된 3 개의 관측값의 차이를 이용한 튀는 자료 찾기 방법을 사용한다(Hong et al., 2009). 구체적으로 이 방법에서는 3 개의 연속된 자료의 차이로부터 d 지수를 아래와 같이 계산한다(Papale et al., 2006):

$$d_i = (F_i - F_{i-1}) - (F_{i+1} - F_i) \quad (19)$$

$$\left( \begin{array}{l} d_i < Md - \left( \frac{z \cdot MAD}{0.6745} \right) \\ d_i > Md + \left( \frac{z \cdot MAD}{0.6745} \right) \end{array} \right. \quad (20)$$

여기서  $Md$  는 차이의 중앙값이고,  $z$  는 Threshold value 이다.  $MAD$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$MAD = \text{median}(|d_i - Md|) \quad (21)$$

계산된  $d_i$  지수가 이 값의 절대값의 중앙값으로부터 벗어난 정도를 가지고 튀는 자료를 판단하게 된다. 이 때 중앙값으로부터 어느 정도 벗어나야 튀는 자료로 구분될 것인가에 대한 기준( $z$ )을 프로그램 내에서 사용자가 원하는 대로 설정할 수 있게 되어 있는데, KoFlux 표준화 과정에서는  $z = 4$  를 사용하였지만

김제 CH<sub>4</sub> 플럭스 자료처리에서는 CH<sub>4</sub>의 편차가 크기 때문에  $z = 7$ 를 사용한다. 주간과 야간의 경우에는 편차가 크게 나타나기 때문에 주간/야간으로 나누어 자료를 처리하였으며 중앙값을 구하는 기간으로는 28 일을 사용하였다.

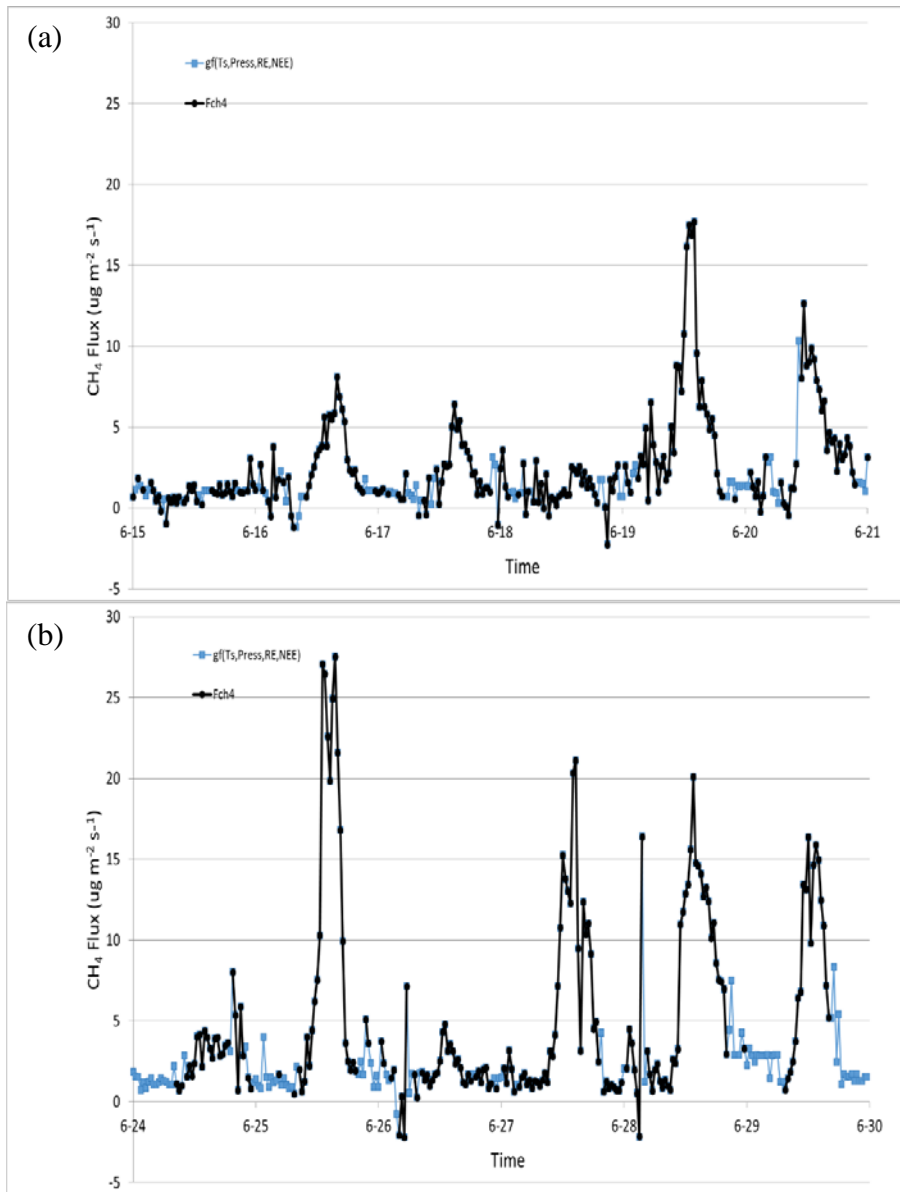
Papale et al.(2006)의 경우, 이 방법을 NEE 자료에만 적용하여 튀는 값을 제거하였다. 그러나 이 방법은 3 개의 연속된 자료를 활용하기 때문에 튀는 자료가 연속적으로 지속되는 경우에는 적절한 결과를 얻지 못할 수 있다. 따라서 KoFlux 에서는 이점을 보완하기 위하여 난류 편차에 직접 영향을 주는 이산화탄소나 수증기 농도뿐만 아니라 개회로 적외선 기체 분석기에서 나오는 automatic gain control(AGC)의 값을 함께 활용하여 튀는 자료를 제거하였다(Hong et al., 2009). 튀는 자료 제거가 적용된 변수는 CO<sub>2</sub> 농도, CO<sub>2</sub> 플럭스, 수증기농도, 잠열 플럭스, 온도, 현열 플럭스 그리고 CH<sub>4</sub> 플럭스이다. 튀는 자료 제거 프로그램은 상용소프트웨어인 매트랩(Matlab)을 사용하여 처리되었으며 현재 KoFlux 표준화 과정 프로그램에 업데이트 되었으며, 이는 국가농림기상센터(www.ncam.kr)을 통해 배포될 예정이다(부록 A.2).

### 3.2.7 빈 자료 메우기

관측자료는 외부의 영향(강수 등)이나 기기의 오류(전기중단, 기기 고장 등)으로 결측 구간이 생기게 된다. 이러한 결측 구간은 계절별 및 연별 플럭스 적산값을 정량화 하는데 있어 어려움이 된다. KoFlux 표준화 과정에서는 이러한 결측 구간을 메꾸기 위해 다양한 빈 자료 메우기 전략을 포함하고 있으며 관측 조건에 따라 상황에 맞는 적절한 방법을 선택할 수 있도록 되어있다. 현열 플럭스의 경우 수정화된 색인 목록 방법을 이용하여 결측 구간을 메우며, 증발산 (잠열 플럭스)의 경우, 군락 젖음의 유무를 고려하여 차단된 강수의 재증발, 즉 젖은 군락 증발이 증발산에 적절히 고려되고, 증발산을 젖은 군락 증발과 증산으로 나눌 수 있도록 하였고, 수정된 색인목록 방법과 칼만 필터를 이용한 Penmen-Montith 방정식을 이용하여 결측 구간 메우기를 수행하였다(Kang et al., 2012). CO<sub>2</sub> 플럭스의 경우, 세가지 다른 방법(i.e. 마찰속도 교정 방법, 광반응 곡선 방법, van Gorsel 방법)을 동시에 적용하여 야간 순생태교환량(Net Ecosystem Exchange, NEE)자료를 교정 후, 총일차생산량(Gross Primary Production, GPP)와 생태계호흡량(Respiration of Ecosystem, RE)으로 나누도록 하여(van Gorsel et al., 2008; Hong et al., 2009; Kang et al., 2013), 최종적으로 사용자가 선택할 수 있도록 하였다.



반면에  $\text{CH}_4$  플럭스의 경우 결측 구간 메우기 방법이 아직 표준화되지 않고 있다(Dengel et al., 2013). 이번 연구에서는  $\text{CH}_4$  플럭스의 결측 구간을 메우기 위해 기존 플럭스 결측 구간 메우기 방법에 사용되고 있는 Marginal Distribution Sampling (MDS) 방법을 사용하였다. MDS 보다 수정된 색인 목록 방법으로 결측 구간을 메우고자 하는 관측값에 영향을 미치는 중요 변수를 산출하여 각 변수의 값을 기준으로 비슷한 조건을 가지는 빈 자료를 메우는 방법이다. 각 변수들간의 상호연관성을 살펴서  $\text{CH}_4$  플럭스 방출에 영향을 미치는 중요한 변수들을 선정하였다.  $\text{CH}_4$  플럭스의 경우 모내기 전후 식생의 유무에 따라 달라지는 모습을 보였다. 또한 각 풍향 별로  $\text{CH}_4$  플럭스의 변동이 다르기 때문에 8 개의 방위로 나누어서 각 방위 별로 MDS 방법을 적용하였다. 모내기 전은 중요변수로 생태계호흡량, 토양온도, 대기압력을 사용하였고, 모내기 후는 순생태교환량, 토양온도, 대기압력을 사용하였다(Fig. 4). MDS 방법은 매트랩을 이용하여 프로그램언어로 작성 되었고, 이는 KoFlux 의 프로그램에 업데이트될 예정이다(부록 A.3).



**Figure 4** Marginal distribution sampling results: (a) before planting and (b) after planting. The planting date was 21 June.

### 1 3.3 프로세스 네트워크 분석

2 생태수문계를 네트워크로 표현할 수 있다고 가정하면,  
3 계(system)를 구성하고 있는 다양한 구성 요소들 각각을  
4 네트워크를 구성하는 노드(node)로 볼 수 있다. 이러한 노드들이  
5 서로 연결되어 하나의 과정(process)을 이루고, 링크(link)들에  
6 의해 연결된 다양한 과정들의 결합과 피드백 고리들(feedback  
7 loops)의 집합을 ‘프로세스 네트워크(process network)’ 이라고  
8 정의한다(Barabasi, 2002; Ruddell and Kumar, 2009a). 노드들과  
9 이들이 링크를 통해 형성하는 하부계(subsystem)들과 과정들  
10 사이의 정보 흐름은 시간에 따라 스스로 변화할 뿐 아니라, 환경의  
11 변화에 적응하면서 독특한 링크들을 생성/차단하는 자기-  
12 조직화(self-organization) 과정을 통해 생태수문계 내부의 다양한  
13 결합과 피드백 과정을 끊임없이 변화시킨다(Ruddell et al., 2013;  
14 Yun et al., 2014a; Yun et al., 2014b). 이러한 정보 흐름을  
15 그려내기 위해서 Ruddell and Kumar (2009a)는  
16 Shannon(1948)의 정보이론을 바탕으로 ‘상호 정보(mutual  
17 information, I)’와 ‘이전 엔트로피(transfer entropy, T)’의 두  
18 가지 확률 개념을 도입하였다. 상호정보는 두 변수 간의 정보가  
19 불확실성을 감소시키는 정도를 의미한다. 따라서, 두 변수 간의  
20 관계성이 높을수록 상호 정보가 많아지며, 상관관계가 없는  
21 경우에는 상호 정보가 0 이 된다. 그러나 상호 정보는 두 변수 간의

1 정보 흐름의 방향을 알려주지는 못한다. 두 변수가 교환하는 정보의  
2 양뿐 아니라 방향과 시간 지연까지 고려하려면, Schreiber  
3 (2000)가 제시한 이전 엔트로피를 사용할 수 있다. 이전  
4 엔트로피는 변수 간의 비선형적 관계뿐만 아니라 인과 관계를  
5 파악하는데 있어서 기존의 상관분석 방법들보다 우수하다. 여기서는  
6 상호 정보와 이전 엔트로피를 계산하는 과정과 이들을 사용하여  
7 프로세스 네트워크를 그려내는 방법을 단계별로 제시하였으며,  
8 이해를 돕기 위해서 전 과정을 다음 그림(Fig. 5)에 모식도로  
9 나타내었다.

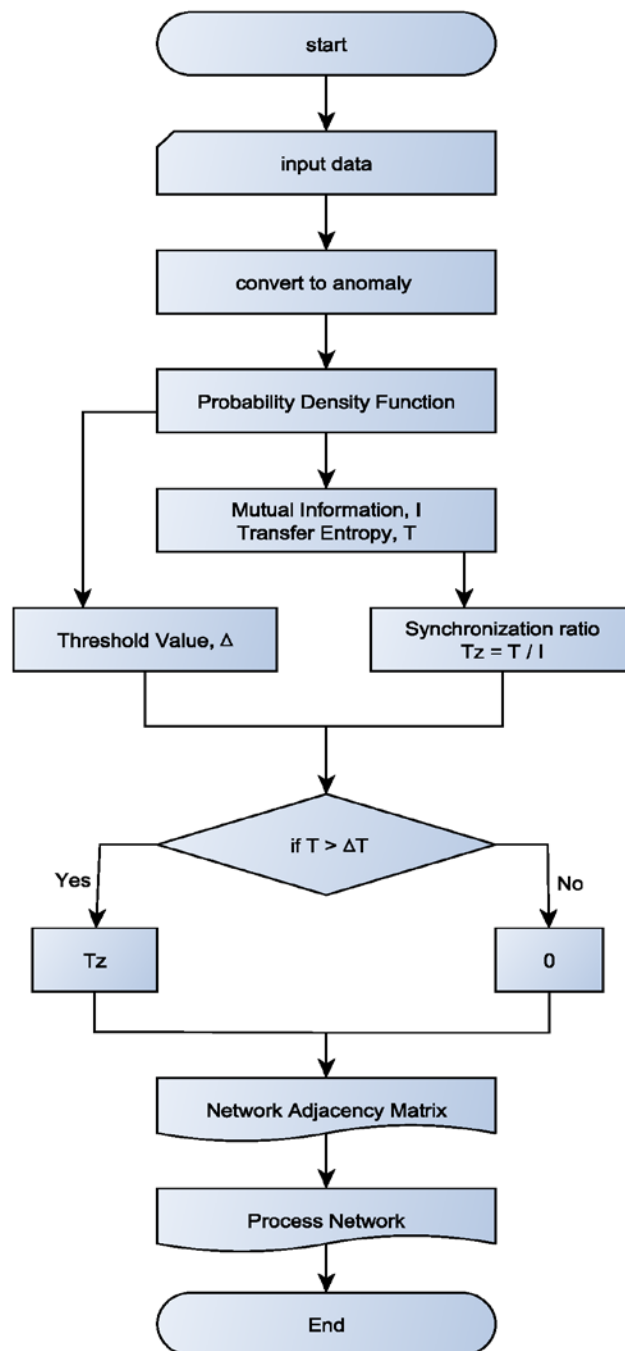


Figure 5 Flow chart for constructing process networks.

### 1 3.3.1 변수선정

2 논 의 생태수문계를 나타내는 주요 변수들을 먼저 선정한 후,  
3 이들의 1 년간 시계열 자료를 확보하였다. 주요 변수로는  
4 총일차생산(GPP), 생태계호흡(RE), 현열플럭스(H),  
5 잠열플럭스(LE), 전천일사(Rg), 강수(Precip), 대기압력(Pa),  
6 포차(VPD), 대기온도(Ta), 토양온도(Ts), 메탄플럭스(CH<sub>4</sub>)의  
7 11 개 요소들을 고려하였다(Table 2). 이들의 시계열은 김제  
8 논(GRK)에서 관측된 2011 년 벼 재배 기간의 자료를 사용하였다.  
9 생태수문시스템의 상태 변화를 다양하게 그려내기 위하여, 벼 재배  
10 기간을 경작활동(물대기, 물떼기 등)과 식물계절학적 변화(생장기간,  
11 엽면적 등)을 고려하여 총 5 개의 기간으로 나누어 프로세스  
12 네트워크 분석을 수행하였다(Table 3). 이전 엔트로피를 계산하기  
13 위해서는 연속적인 시계열 자료가 필요하기 때문에 모든 자료는  
14 결측 자료의 보완을 KoFlux 표준화 과정을 통해 위해 빈 자료  
15 메우기를 수행하였다(Kang et al. 2014a). 빈 자료 메우기에 대한  
16 내용은 이전 2.2.7 에서 자세히 나와있다.

1

2

3

4

5

6 **Table 2** List of Variables

Symbole	Description	Units
Pa	Atmospheric pressure	Kpa
NEE	Net ecosystem exchange	$\text{gC m}^{-2}\text{s}^{-1}$
GPP	Gross primary productivity	$\text{gC m}^{-2}\text{s}^{-1}$
RE	Estimated ecosystem respiration	$\text{gC m}^{-2}\text{s}^{-1}$
LE	Latent heat flux	$\text{Wm}^{-2}$
H	Sensible heat flux	$\text{Wm}^{-2}$
VPD	Vapor pressure deficit	hpa
Ta	Air temperature	$^{\circ}\text{C}$
Ts	Soil temperature	$^{\circ}\text{C}$
SHF	Soil heat flux	$\text{Wm}^{-2}$
Rsdn	Downward short radiation	$\text{Wm}^{-2}$
Precip	precipitation	mm

7

1

2

3 **Table 3** Characteristic of 5 periods in Gimje sites at 2011.  
 4 Precipitation conditions are represented as total amount of  
 5 rainfall (mm) / number of rainy days / maximum rain intensity  
 6 (mm day<sup>-1</sup>).

	Time	Phenology	event	LAI	Precipitation conditions
Period 1	7/1~7/24	Green-up/Tillering	Rice transplanting on 6/19, water logged	1.2	352 / 16 / 114
Period 2	7/25~8/18	Peak Growth / Heading	Water drains on 7/25, fertilised on 8/19, maximum GPP	3.0	305 / 17 / 216
Period 3	8/26 ~9/18	Grain-Filling	Irrigation/drainage from 8/26, 8/19 fertilizer	4.6	48 / 5 / 24
Period 4	9/26~10/15	Senescence	Last Drained on 9/26, Harvest on 10/16	5	17 / 3 / 6
Period 5	10/27~11/19	Post-Harvest	Barley sowing on 10/26	0	39 / 10 / 18

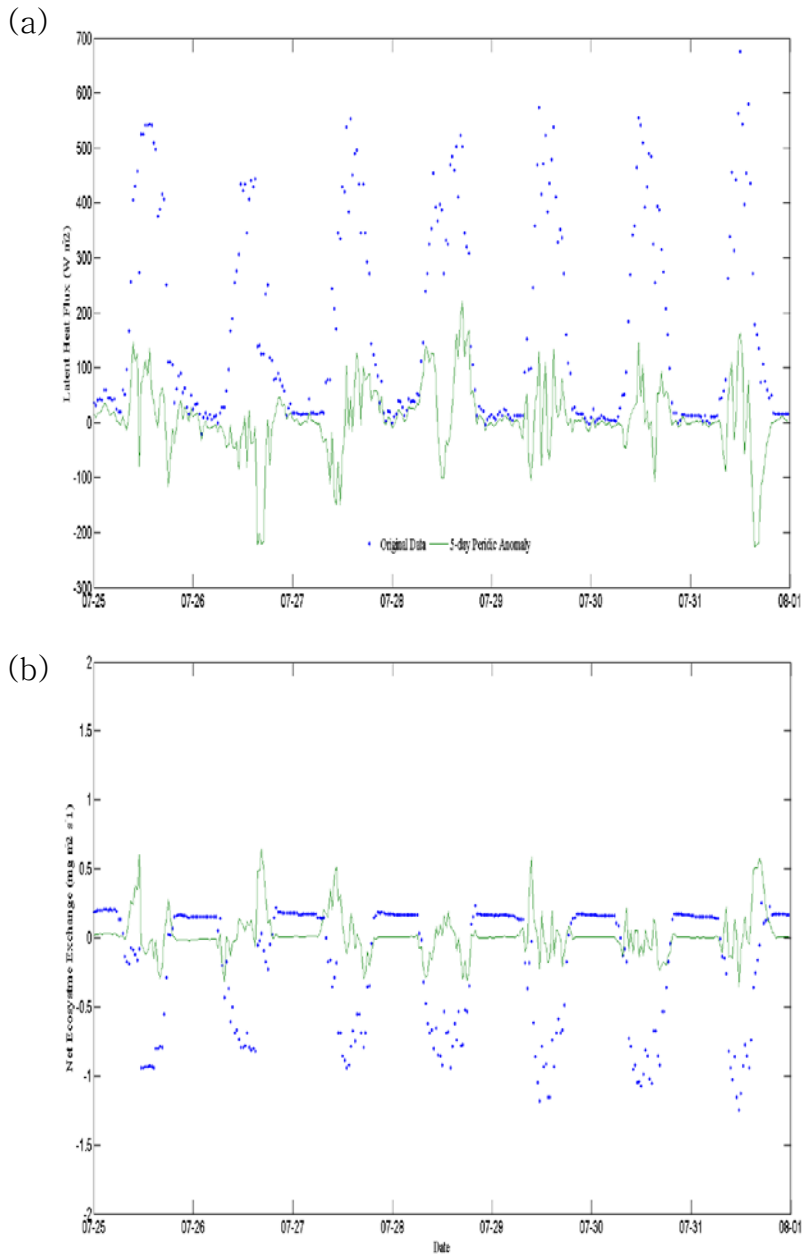
7



### 3.3.2 시간규모와 자료의 선처리

시계열의 변동은 밤과 낮, 일, 계절 및 연 주기 등의 다양한 시간 규모의 변동들이 합쳐져서 나타난다. 변동을 초래하는 지배적인 시간 규모는 스펙트럼 분석을 통해 분리해낼 수 있는데, CO<sub>2</sub> 플럭스의 경우, 1 년, 6 개월, 3 개월 등을 포함한 하루 이상의 주기들이 대체로 전체 변동의 70% 정도를 설명할 수 있다(Baldocchi et al., 2001). 반면에, 특정한 주기를 보이지 않는 24 시간 이내의 시간 규모에 해당하는 나머지 30%는 복잡성으로 인해 그 변화를 설명하기가 어렵다. 따라서, Ruddell and Kumar (2009a)와 마찬가지로, 하루 이내의 시간규모를 대상으로 생태수문시스템을 분석하기 위해 30 분 간격의 자료를 사용하였다. 시계열 자료로부터 24 시간 이상의 주기들을 제거하기 위해 아노말리(anomaly) 방법을 사용하여 시계열 자료를 필터링하는 선처리(pre-processing) 작업을 수행하였다. 아노말리 시계열은 대상 변수의 특정 시점이 포함된 날과 이전 4 일을 포함한 총 5 일의 이동 평균과 해당 시점의 값의 차이를 계산하여 생성하였다. 아노말리 효과는 주기적인 효과를 제거하면서 하루 이내의 사건에 민감한 영향을 받는다. Fig. 6 은 아노말리 방법이 적용된 잠열 플럭스와 순생태교환량의 결과이다. 아노말리 방법이 적용하기 전 관측값에서는 일정한 주기의 변화가 보여지고 있으나 방법이 적용된 이후 주기적인 변동이 사라지고, 하루 이내의 시간 동안

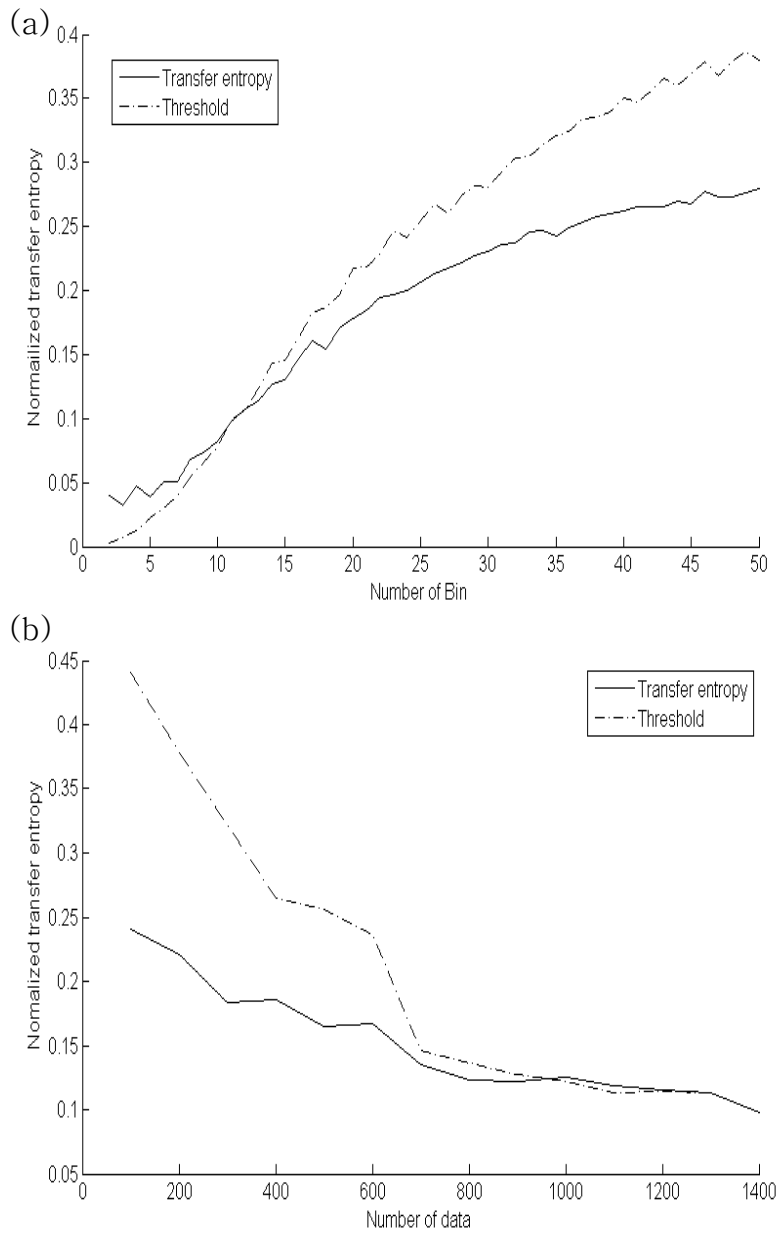
- 1 발생된 사건에 의한 변화가 크게 나타나고 있다. 특히 7 월 28 일,
- 2 그리고 31 일에 강수가 있었는데, 강수가 발생되었을 때 변화가
- 3 크게 나타나고 있다. 그러나 28 일에 이어 29 일 연속적인 강수가
- 4 올 경우, 28 일보다 작은 변화를 보여, 반복적인 사건의 영향의
- 5 효과가 줄어드는 모습을 보이고 있다.



**Figure 6** Illustration of the original data time series and transformed 5 day periodic anomaly time series for LE and NEE. The anomaly removes the diurnal cycle, rendering each variable as a departure from the norm.

### 1 3.3.3 확률밀도추정

2 상호 정보(I)와 이전 엔트로피(T)는 주변 확률 분포(marginal  
3 probability distributions)와 결합 확률 분포(joint probability  
4 distributions)로부터 계산한다. 실제 관측 자료로부터 정확하게  
5 확률 밀도를 추정하기 위해, Ruddell and Kumar (2009a)는 자료의  
6 전체 범위를 고정된 간격으로 분할하여 자료의 분포를 파악하였다.  
7 고정 간격의 퀘(bin) 방법을 사용하면 연속적인 시계열 자료를  
8 쉽고 빠르게 확률 밀도 함수로 변환할 수 있는데, 자료의 수와  
9 분포에 알맞은 퀘의 수를 정하는 것이 중요하다. 예를 들어, 퀘의  
10 수를 너무 적게 정할 경우 정보량이 작아지게 되고, 퀘의 수를 너무  
11 많이 정할 경우 각각의 퀘에 들어가는 자료의 수가 적어져  
12 정확도가 떨어지게 된다. 다음의 그림(Fig 7)은 시계열 자료의 수와  
13 빈의 수에 따른 이전 엔트로피의 변화이다. 이러한 결과에 딸 고정  
14 간격의 퀘 방법을 사용할 때 자료 수는 최소 500-1000 개가  
15 필요하며, 이때 퀘의 수는 10-20 개 정도가 적합하다. 따라서, 30 분  
16 단위의 관측 자료를 사용할 경우, 최소 21 일의 자료가 필요하다.  
17 본 연구에서 설정한 5 개의 기간의 경우, 최소 1,008 개(21 일)에서  
18 최대 1,056 개(22 일)의 자료를 사용하였다.



**Figure 7** Estimation issues for transfer entropy: (a) Normalized transfer entropy of number of bins using 1400 data and (b) Same as (a) but for number of data using 11 bins.

### 3.3.4 상호정보와 이전 엔트로피계산

확률밀도로 변환된 시계열 자료들로부터 상호 정보와 이전 엔트로피를 계산하기 위해, 불확실성의 척도를 나타내는 새넨(Shannon) 엔트로피를 사용한다. 확률밀도함수  $p(x_t)$ 의 이산 시계열  $X_t$ 의 새넨 엔트로피는 다음과 같이 쓸 수 있다 (Shannon, 1948):

$$H(X_t) = -\sum p(x_t) \log p(x_t) \quad (1)$$

만약 시계열  $X_t$ 가  $m$ 개의 이산 구역으로 배분될 수 있다면,  $H(X_t)$ 는  $0 \leq H(X_t) \leq \log(m)$ 의 범위를 갖는다. 이제, 두 개의 시계열  $X_t$ 와  $Y_t$ 를 고려하면, 상호 정보는 다음과 같이 정의된다:

$$I(X_t, Y_t) = \sum_{x_t, y_t} p(x_t, y_t) \log \frac{p(x_t, y_t)}{p(x_t)p(y_t)} \quad (2)$$

식(2)와 식(1)을 사용하여 다음과 같이 쓸 수 있다(Schreiber, 2000).

$$I(X_t, Y_t) = H(X_t) + H(Y_t) - H(X_t, Y_t) \quad (3)$$

상호정보는  $0 \leq I(X_t, Y_t) \leq \min[H(X_t), H(Y_t)]$ 의 범위에서 두 시계열이 대칭이기 때문에, 정보 흐름의 방향을 알 수가 없다. 또한, 한 시계열의 과거 정보가 다른 시계열의 현재 상태에 미치는 영향을

1 고려하지 못한다. Schreiber (2000)는 방향성과 과거 정보의  
 2 흐름을 포함할 수 있는 이전 엔트로피를 다음과 같이 정의하였다.

$$3 \quad T(X_t > Y_t, \tau) = \sum_{y_t, y_{t-\Delta t}, x_{t-\tau\Delta t}} p(y_t, y_{t-\Delta t}, x_{t-\tau\Delta t}) \log \frac{p(y_t | y_{t-\Delta t}, x_{t-\tau\Delta t})}{p(y_t | y_{t-\Delta t})} \quad (4)$$

4 여기서  $\tau$ 는 시간 지연(time lag)을 나타낸다. 이전 엔트로피,  $T$ 는  
 5 현재 정보  $Y_t$ 가 시간 지연  $\tau$ 만큼 떨어진 과거  $X_t$ 로부터 받는  
 6 정보량을 의미한다. 이때  $Y_t$ 는 자신의 과거로부터도 정보를  
 7 받으므로 직전 과거  $Y_{t-\Delta t}$ 의 정보량을 고려한다. Ruddell and Kumar  
 8 (2009a)는 식 (4)를 Knuth (2005)의 방법을 사용하여 성분 새넨  
 9 엔트로피로부터 다음과 같이 계산하였다:

$$10 \quad T(X_t > Y_t, \tau) = H(X_{t-\tau\Delta t}, Y_{t-\Delta t}) + H(X_t, Y_{t-\Delta t}) - H(Y_{t-\Delta t}) - H(X_{t-\tau\Delta t}, Y_t, Y_{t-\Delta t}) \quad (5)$$

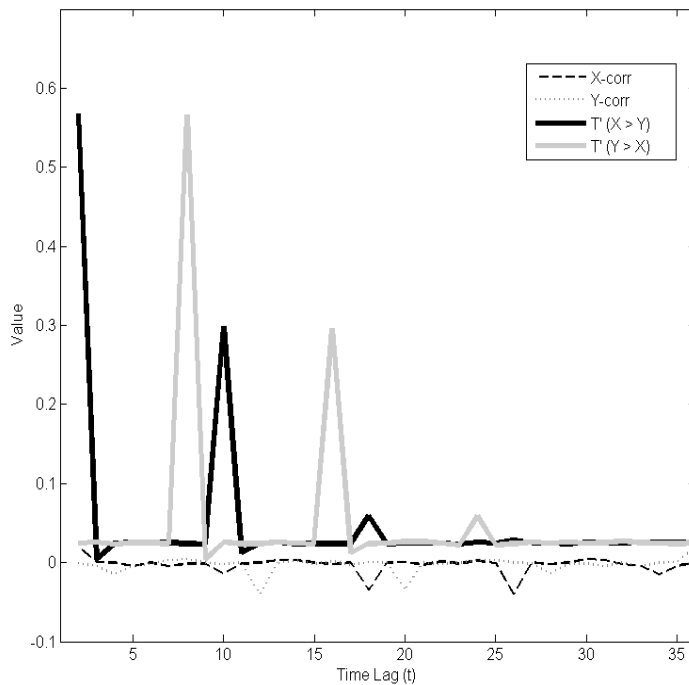
11 이전 엔트로피의 강점을 보기 위해 기존 선형교차상관관계(linear  
 12 cross-correlation)와 비교를 실시하였다. 임의의 두 개의 시계열  
 13 자료를 logistic map 을 이용하여 비선형관계를 만들어내어  
 14 적용하였다. logistic map 관계는 아래의 관계식을 사용하였다

$$15 \quad X_t = 3.99 \cdot Y_{(t-7)} \cdot (1 - Y_{(t-7)}) \quad (5)$$

$$16 \quad Y_t = 3.99 \cdot X_{(t-1)} \cdot (1 - X_{(t-1)}) \quad (6)$$

1    두    개의    임의의    시계열    자료의    이전    엔트로피와  
2    선형상호상관관계의    결과는    다음의    그림 (Fig. 8)에    제시되었다.  
3    선형상호상관관계에서는  $X_t$  에서  $Y_t$  로의    관계는    보이지만  $Y_t$  에서  
4     $X_t$ 로의    관계가    보이지    않는데    반해    이전    엔트로피는    두    개    시계열의  
5    지연시간을    정확히    잡아내는    것을    확인    할    수    있다.    이러한    점은  
6    비선형관계인    변수들    간의    관계를    보다    정확히    이해하는데    도움이  
7    된다.

8



**Figure 8** Results of transfer entropy and linear cross correlation for a synthetic system of two logistic maps at a time lag of 1 for the  $X_t > Y_t$  coupling and a time lag of 7 for the  $Y_t > X_t$  coupling



### 1 3.3.5 Threshold 값

2 수치화된 변수들 간의 정보 흐름이 의미가 있기 위해서는 그  
3 값의 통계적 유의성이 확보되어야만 우연에 의한 연관성을 배제할  
4 수 있다. 따라서, 각 변수 간의 정보 흐름에 대해 유의성  
5 Threshold 값을 정하고, 이 값을 넘지 않는 경우에는 무의미한  
6 값으로 판단하였다. Threshold 값을 정하기 위해서 몬테  
7 칼로(Monte Carlo) 시뮬레이션 방법을 사용하였다. 우선 각 변수의  
8 시계열 자료를 시간에 대해 임의로 재배열하여 새로운 시계열  
9 자료를 만들고, 시간적 연관성이 파괴된 새로운 시계열  
10 자료들로부터 대리(surrogate) 이전 엔트로피를 계산하였다.  
11 이렇게 반복적으로 임의로 재배열된 시계열 자료들로부터 계산된  
12 대리 이전 엔트로피 결과가 그 횟수를 증가시킬수록 가우시안  
13 분포에 접근하였다. 이 가우시안 분포에 편측검정(one-tailed  
14 hypothesis)을 적용하여 95%나 99% 신뢰도로 정해진 Threshold  
15 값 이전 엔트로피의 값을 넘는 경우만을 유의성이 있는 것으로  
16 판단하였다. 반복 횟수가 늘어날수록 Threshold 값의 변화가  
17 줄어들지만 과도하게 늘어날 경우 계산시간이 증가하게 된다. Fig  
18 9 에서 보이듯이 100 번 수행하였을 경우 Threshold 값의 변화가  
19 거의 발생하지 않고 일정하게 나오고 있다(Ruddell and Kumar  
20 2009a). 이에 따라 본 연구에서는 Threshold 값이 안정화되게  
21 하기 위해서 100 번의 몬테 칼로 시뮬레이션을 수행하였다.

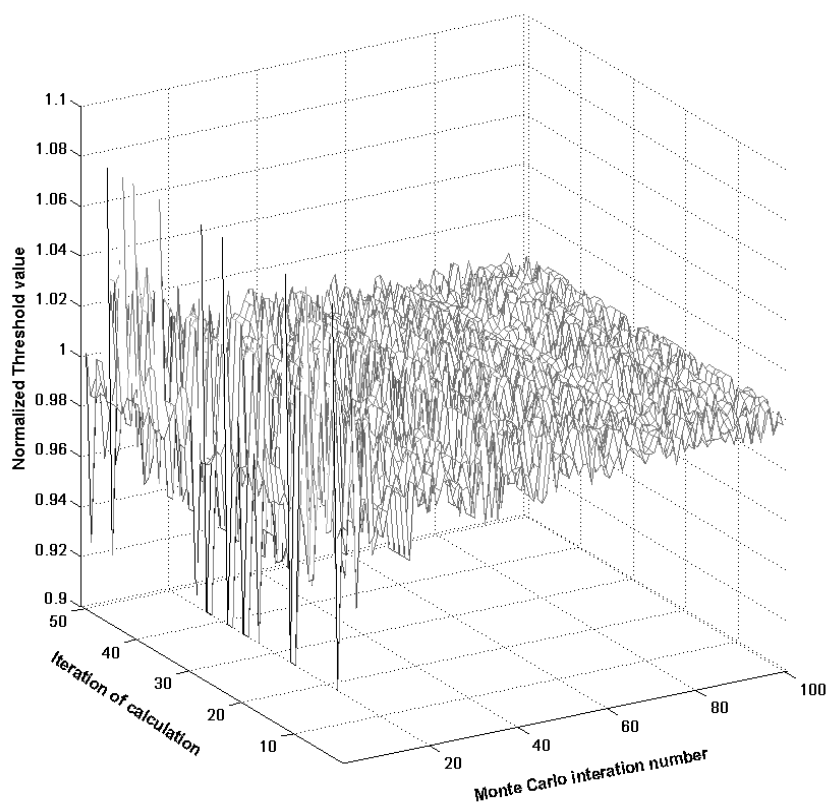


Figure 9 Threshold value change for Monte–Carlo iteration

### 1 3.3.6 동기화비

2 상호 정보와 이전 엔트로피를 동시에 고려하여 그 상대적인  
3 역할을 비로 나타낸 동기화비(synchronization ratio,  $T_z$ )는 정보  
4 흐름의 결합 형태를 결정하는데 사용된다(Ruddell and Kumar,  
5 2009a)

$$6 \quad T_z(X_t > Y_t, \tau) = \frac{T(X_t > Y_t, \tau)}{I(X_t, Y_t)} \quad (5)$$

7 여기서  $T_z$ 는 비대칭 구조로서, 상호간의 정보 흐름의 시간 지연과  
8 강도를 나타낸다. 두 시계열 자료간의 동기화비( $T_z$ )를 이용하여 두  
9 시계열 자료의 정보 흐름의 상태를 정의할 수 있다. Ruddell and  
10 Kumar (2009a)는 Threshold value 과  $T_z$ 를 통해 결합 형태의  
11 기준을 Table 4와 같이 제시하였다. 결합 형태는 총 4가지로 Type  
12 1(동기화 지배적, synchroniation dominated), Type 2(피드백  
13 지배적, feedback dominated), Type 3(강제 지배적, Forcing  
14 dominated), Type 4(분리됨, decoupled)으로 분류된다. 변수들간의  
15 결합 형태는 비대칭적이므로 네 가지 타입을 고려하면 최대  
16 10 가지의 전형적인 조합, 즉 정규 결합(canonical coupling)을  
17 예상할 수 있다.

1

2

3

4 **Table 4** Logical criterion for coupling type classification (Ruddell  
5 and Kumar, 2009a)

	$T > \Delta(T)$	$I > \Delta(I)$	$T > I$	Description
Type 1 Synchronization dominated	F	T	F	significant shared information, no significant information flow
Type 2, Feedback dominated	T	T	F	significant shared information greater than significant information flow
Type 3, Forcing dominated	T	-	T	significant information flow greater than significant shared information
Type 4 , uncoupled	F	F	-	no significant information flow or shared information; decoupled

6

### 1 3.3.7 네트워크 행렬

2 프로세스 네트워크를 그리기 위해 필요한 변수들 간의 상관관계,  
3 정보 흐름의 크기와 방향, 결합 형태, 피드백 고리 및 시간 지연의  
4 규모 등을 계산하여 네 가지 형태의 네트워크 행렬로 나타낸다.  
5 첫번째 행렬은 상호 정보의 행렬로서, 각 변수간의 상관관계를  
6 나타낸다. 두번째 행렬은 상대 상호 정보의 행렬로서, 변수  
7 자체와의 상호 정보량을 기준으로 다른 변수와의 상호 정보량의  
8 크기를 상대적으로 나타낸 행렬이다. 이를 통해 한 변수의  
9 불확실성이 다른 변수의 정보에 의해 얼마나 감소되는지를 살펴 볼  
10 수 있다. 세번째 행렬은 상호 정보와 이전 엔트로피를 이용한  
11 동기화비의 행렬( $AT_z$ )을 나타낸다. 몬테 카를로 시뮬레이션으로부터  
12 구해진 Threshold 값과  $T_z$ 를 이용하여 다음과 같이 계산한다:

$$13 \quad AT_z(i,j) = \begin{cases} T_z = (X_t^i > X_t^j, \tau) & \text{if } T > \Delta T \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

14 네번째 행렬은 중요한 정보 흐름의 시간 규모를 나타낸다. 이  
15 행렬에 주어진 값들의 상대적 크기를 고려하여 같은 결합 형태(i.e.,  
16 Type 1 또는 2)를 보이면서 동시에 비슷한 규모의 시간 지연을  
17 갖는 변수들을 서로 묶어서 하나의 하부계로 분류하게 된다.

1 Table 5-8 는 5 개 기간 중에서 3 번째 기간인 두번째 물대기  
2 기간(Table 3)에 대한 실제 행렬의 예이다. Table 5 은 상호정보를  
3 나타내는 첫 번째 네트워크 행렬로서 대칭 구조를 이룬다. 이를  
4 바탕으로 계산된 상대적인 상호 정보를 보여주는 Table 6 의 행렬은  
5 변수들간의 동기화 정도를 나타내며, 이를 통해 어떤 변수들이 서로  
6 동기화 형태로 연결되어 하나의 하부계를 형성하는지를 알 수 있다.  
7 Ruddell and Kumar (2009a)는 Table 6 에서 동기화를 판단하는 첫  
8 번째 기준값으로 '10' 을 제시하였다. 이 기준을 만족하는  
9 변수들의 쌍(pair)들 중에서, Table 7 에서 Threshold 값을 넘지  
10 못하는 변수들의 쌍들이 최종적으로 동기화 지배적인 Type 1 로  
11 구분된다. Table 7 는 상호 정보와 이전 엔트로피의 비를 나타내는  
12 동기화비를 보여주며, 그 값이 1 이상인 경우는 피드백 지배적인  
13 Type 2 로 구분되며, 1 미만인 경우에는 강제 지배적인 Type 3 으로  
14 구분된다. 그 값이 Threshold 값을 넘지 못할 경우에는 Type  
15 4 로서, 분리됨으로 구분된다(Table 3 참조). Table 8 는 하루  
16 이내(정확히 말하면, 30 분에서 18 시간까지)의 범위 내에서  
17 유의성있는 정보 흐름의 시간 지연을 보여주며, 각각 최초의  
18 유의미한 시간 지연, 마지막 유의미한 시간 지연, 괄호 안의 숫자는  
19 유의미한 시간 지연의 총 개수, 그리고 이전 엔트로피가 최대일  
20 때의 시간 지연을 나타낸다.

1

2

3 **Table 5** Mutual information of period 3 in Gimje rice paddy.

4 Source variable index X is in rows; sink variable index Y is in

5 columns.

AI	GPP	H	LE	Rg	Preci p	RE	VPD	Ta	Pa	Ts	Fch4
GPP	59	16.1	21	21	1.2	12	7.9	11.6	6.8	5.8	x
H	16.1	56.7	15.9	16.4	1.1	8.6	6.4	7.7	4.3	5	x
LE	21	15.9	56.6	27.1	1.5	13.4	10.9	12	8.9	6.5	1.6
Rg	21	16.4	27.1	55.5	1	11.2	10	10.5	7.9	5.7	x
Precip	1.2	1.1	1.5	1	11.3	2.5	1.6	2.6	2.2	2.4	x
RE	12	8.6	13.4	11.2	2.5	84.8	10.6	56.3	16.7	21.1	2.4
VPD	7.9	6.4	10.9	10	1.6	10.6	76.8	10.6	9.4	8.9	1.8
Ta	11.6	7.7	12	10.5	2.6	56.3	10.6	88.8	18.6	21.6	2.3
Pa	6.8	4.3	8.9	7.9	2.2	16.7	9.4	18.6	93.9	34.5	2.9
Ts	5.8	5	6.5	5.7	2.4	21.1	8.9	21.6	34.5	96.4	2.5
Fch4	x	x	1.6	x	x	2.4	1.8	2.3	2.9	2.5	31.7

6

1

2

3 **Table 6** Relative mutual information of period 3 in Gimje rice  
 4 paddy. The percentage of uncertainty of each sink explained by  
 5 source. Source variable index X is in rows; sink variable index Y  
 6 is in columns.

	GPP	H	LE	Rg	Precip	RE	VPD	Ta	Pa	Ts	Fch4
GPP	100	28.3	37.1	37.7	10.8	14.2	10.3	13.1	7.2	6.1	x
H	27.3	100	28.1	29.6	10.2	10.1	8.4	8.6	4.6	5.2	x
LE	35.6	28	100	48.9	13	15.8	14.2	13.5	9.5	6.7	5.2
Rg	35.5	28.9	48	100	9	13.2	13	11.8	8.4	5.9	x
Precip	2.1	2	2.6	1.8	100	2.9	2.1	2.9	2.4	2.5	x
RE	20.4	15.1	23.7	20.2	21.8	100	13.9	63.4	17.8	21.9	7.5
VPD	13.4	11.3	19.3	18	14.6	12.5	100	12	10	9.3	5.8
Ta	19.7	13.5	21.2	18.9	22.9	66.4	13.8	100	19.8	22.4	7.1
Pa	11.5	7.6	15.8	14.2	19.8	19.7	12.2	21	100	35.8	9.1
Ts	9.9	8.9	11.5	10.2	21.3	24.9	11.6	24.3	36.8	100	7.9
Fch4	x	x	2.9	x	x	2.8	2.4	2.5	3.1	2.6	100

7



1

2

3 **Table 7** The ratio of the maximum lag T to mutual information  
 4 for all significant couplings of period 3 in Gimje rice paddy.  
 5 Source variable index X is in rows; sink variable index Y is in  
 6 columns.

	GPP	H	LE	Rg	Precip	RE	VPD	Ta	Pa	Ts	Fch4
GPP	0.15	0.5	0.35	x	1.35	x	x	x	x	x	3.37
H	0.47	0.11	0.42	x	1.15	x	x	x	x	x	2.96
LE	0.42	0.49	x	x	1.14	x	x	x	x	x	2.32
Rg	0.44	0.49	0.26	x	1.62	x	x	x	x	x	2.94
Precip	1.84	1.83	1.21	x	0.1	x	x	x	x	x	x
RE	x	x	x	x	0.72	x	x	x	x	x	1.64
VPD	x	1.23	x	x	0.87	x	x	x	x	x	2.15
Ta	x	x	x	x	0.67	x	x	x	x	x	1.87
Pa	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	1.44
Ts	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	1.74
Fch4	x	x	x	x	1.99	x	x	x	x	x	0.08

7

1 **Table 8** The time lags of significant information flow in the interval, Significant lags times are [first–last, (number),  
2 max] of period 3 in Gimje rice paddy. Source variable index X is in rows; sink variable index Y is in columns.

	GPP	H	LE	Rg	Precip	RE	VPD	Ta	Pa	Ts	Fch4
GPP	1-3(5),2	0.5-4(8),1	0.5-1.5(2),0.5	x	8-15(12),13	x	x	x	x	x	2-18(16),15
H	0.5-2(3),2	1-3.5(4),1	0.5-1(2),1	x	9.5-15.5(8),10	x	x	x	x	x	0.5-18(16),15.5
LE	0.5-3(6),0.5	0.5-3.5(6),1	x	x	6-15.5(15),11.5	x	x	x	x	x	9.5-18(16),13
Rg	0.5-4(8),1	0.5-4(8),1	1-1(1),1	x	7-15.5(17),12.5	x	x	x	x	x	11-18(15),13.5
recip	11.5-17(6),13.5	12-14(5),13.5	12-12(1),12	x	1-5(6),3	x	x	x	x	x	x
RE	x	x	x	x	7.5-12(9),12	x	x	x	x	x	0.5-18(21),0.5
VPD	x	0.5-2.5(3),1	x	x	7-11(5),10	x	x	x	x	x	0.5-18(31),11.5
Ta	x	x	x	x	8-12.5(7),12	x	x	x	x	x	0.5-18(23),14.5
Pa	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	0.5-18(32),5
Ts	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	0.5-18(36),11
Fch4	x	x	x	x	3-3(1),3	x	x	x	x	x	1-14(10),1

### 1 3.3.8 프로세스 네트워크 그리기

2 앞서 구해진 네트워크 행렬에 제공된 정보를 바탕으로, (1)  
3 하부계의 유무를 확인하고, (2) 확인된 각 하부계 단위로 구성  
4 변수들을 그룹으로 모은 후, (3) 결합형태를 구분하여 링크를  
5 표시하되, 먼저 그룹 내의 구성변수들을 연결하고, (4) 그룹과 다른  
6 그룹, 또는 다른 그룹 내의 변수들, 또는 그룹에 속하지 않은  
7 변수들과의 링크를 표시하고, (5) 피드백 고리로 연결되어 서로  
8 합쳐질 수 있는 하부계들을 찾아서 다시 하나의 그룹으로 묶은 후,  
9 (6) 모든 링크에 시간 규모를 표시하고, 마지막으로 (7) 각  
10 하부계의 구성 변수들의 특성, 결합 형태, 시간 지연의 규모 등을  
11 고려하여 각 하부계를 대표하는 명칭을 부여함으로써, 프로세스  
12 네트워크 그리기를 완성하게 된다.

13 첫 번째 단계인 하부계의 유무 확인이란, 먼저 결합 형태와 시간  
14 지연의 규모가 같거나 유사한 변수들을 하나의 그룹으로  
15 묶음으로써 생태수문계를 구성하고 있는 하부계들의 존재를  
16 확인하는 과정을 말한다. 여기서, 하부계란 시스템 속의 시스템들을  
17 말하는 것으로, 서로 연결된 요소(또는 변수)들이 상호작용을 통해  
18 일관되게 조직화되어 무언가를 성취해내는 집합체를  
19 의미한다(Meadows, 2008; Ruddell and Kumar, 2009a). 하부계는,  
20 정보 흐름의 결합 형태에 따라, Type 1 또는 Type 2 로 연결되는

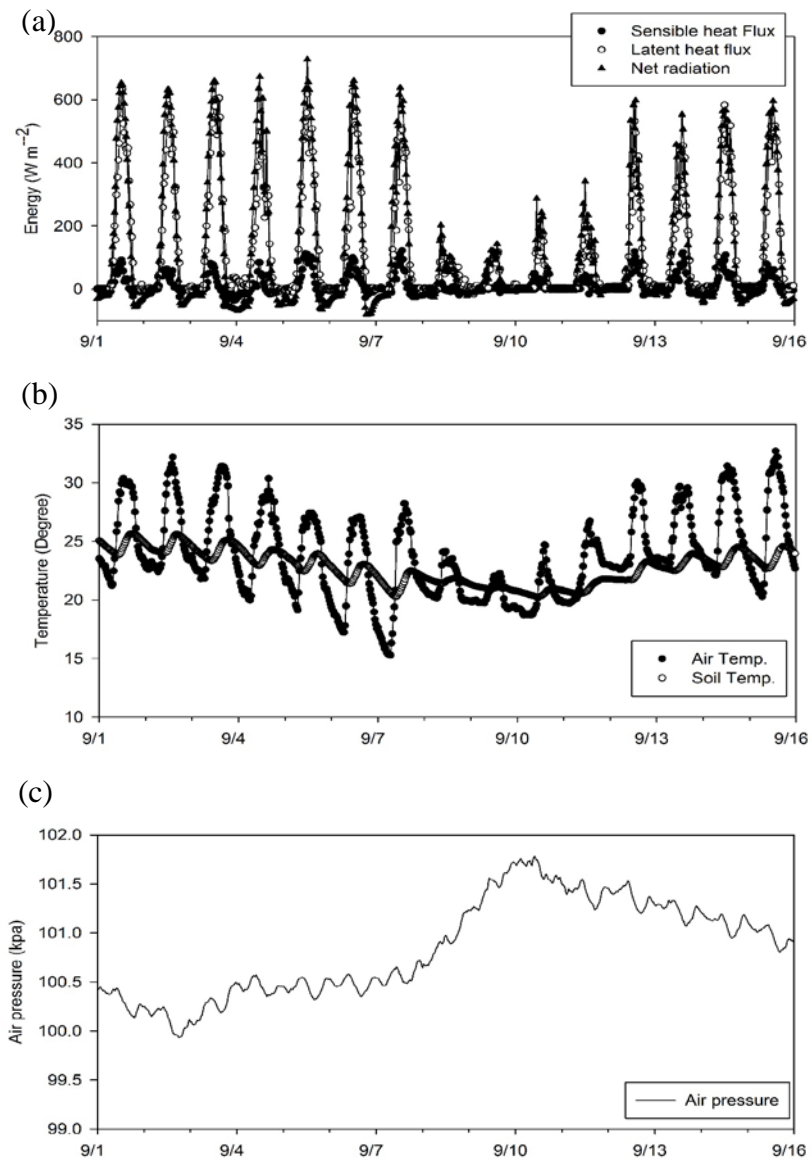
1    두 가지 종류를 생각할 수 있다. 이때 정보 흐름의 시간 지연의  
2    규모도 크게 다르지 않아야 한다. 하부계들 사이에 Type 2 또는  
3    3 의 정보 흐름이 양방향으로 존재하여 피드백 고리를 형성하는  
4    하는 경우, 두 하부시스템은 합쳐진 하나의 하부계로 볼 수 있다.  
5    이렇게 그려지는 프로세스 네트워크를 다양한 환경조건에서  
6    분석함으로써, 어떠한 변수들이 서로 연결되어 하부계를 구성하며,  
7    어떠한 하부계들이 생태수문계를 구성하며, 하부계들이 어떻게 서로  
8    정보 흐름을 통해 피드백 고리를 생성하며, 이러한 자기-조직화  
9    과정을 통해 생태수문계의 상태가 어떻게 역동적으로 변화하는지를  
10    이해할 수 있을 것이다. 단계적인 프로세스 네트워크 그리기의 실제  
11    예는 결과 및 고찰에 제시하였다.

## 제 4 장 결과 및 고찰

### 4.1 관측 결과

#### 4.1.1 미기상학적 환경

2011 년도 9 월 1 일부터 9 월 15 일까지의 기간 동안 관측지는 관개와 배수를 반복하였다. Fig. 10 은 이 기간에 대한 에너지 수지(순복사, 현열 및 잠열 플럭스), 토양 온도, 기압을 시계열로 나타낸 그림이다. 강수는 전체 기간 중 9 월 9 일부터 9 월 12 일에 걸쳐 23.5 mm 가 관측되었고, 보웬비(bowen ration)는 0.1 이었다. 순복사는 한낮(11:00-15:00 hrs)에 비가 오지 않은 경우 최대  $727 \text{ W m}^{-2}$ , 평균  $490 \pm 161 \text{ W m}^{-2}$  이고 비가 온 경우 최대  $597 \text{ W m}^{-2}$ , 평균  $235 \pm 148 \text{ W m}^{-2}$  이었다. 대기온도와 토양온도는 각각 평균  $23.7 \pm 3.7 \text{ }^{\circ} \text{C}$ , 평균  $22.8 \pm 1.4 \text{ }^{\circ} \text{C}$  였다. 기압은 9 월 1 일부터 9 월 6 일까지는 일정하다 9 월 7 일부터 증가하다 9 월 10 일 저녁에 최고기압 101.8 kPa 를 기점으로 감소하는 경향을 보였다. 강수가 온 기간임에도 불구하고 지상에서 기압이 상승하는 현상을 보이고 있다.



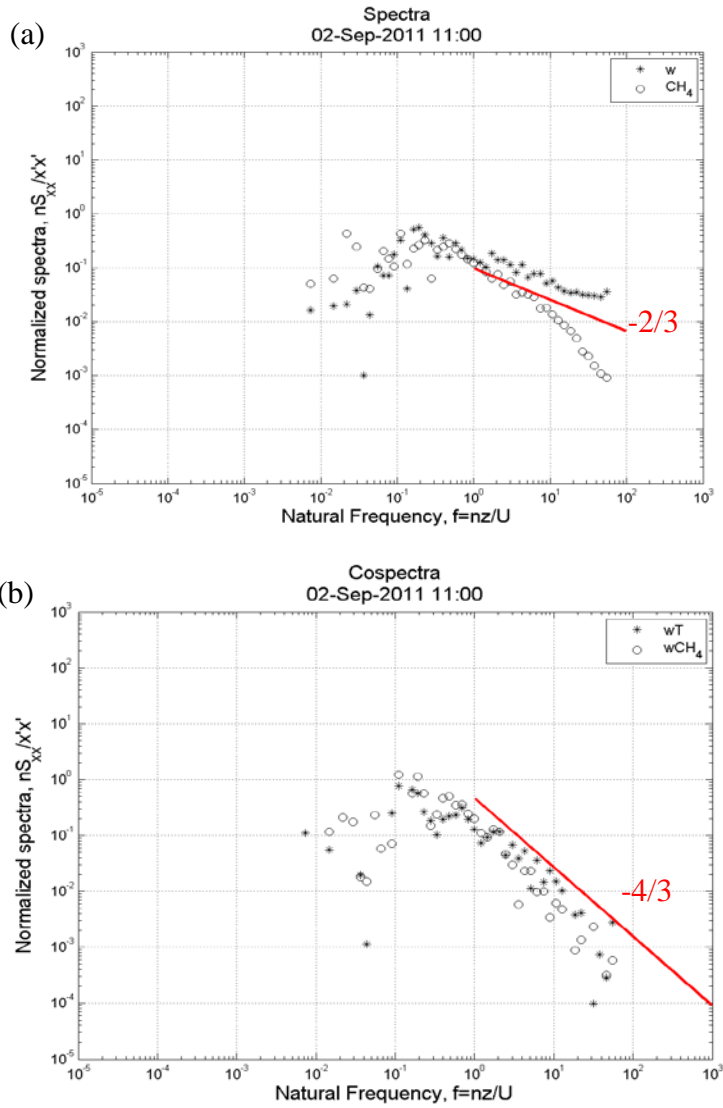
**Figure 10** Daily variations of (a) surface energy fluxes, (b) soil temperature and air temperature (c) atmospheric pressure in Gimje rice paddy site at September 2011

#### 4.1.2 먹스펙트럼 분석

LI-7700 과 CSAT3 에서 관측된 분산 및 공분산 자료의 품질을 확인 하기 위하여 충분한 난류가 발생된(모닌-오브코브 안정도 지수:  $-0.5$ ) 9 월 2 일의 특정 시간(11:00 ~11:30 hrs) 대해 연직 풍속( $w$ )과  $\text{CH}_4$  농도( $m$ )의 먹스펙트럼과  $\text{CH}_4$  플럭스( $\overline{w' m'}$ ) 및 열 플럭스( $\overline{w' T'}$ )의 코스펙트럼을 분석하였다(Fig. 11). 변수들간의 상사성을 가정하면, CSAT3 에서 독립적으로 관측되는  $w$ 와  $T$ 의 스펙트럼 및  $\overline{w' T'}$  코스펙트럼을 기준으로 메탄 자료를 비교해 볼 수 있다. 따라서  $\text{CH}_4$  농도  $m$ 의 스펙트럼과  $\text{CH}_4$  플럭스  $\overline{w' m'}$ 의 코스펙트럼이 보이는 차이는 곧 LI-7700 의 경로 길이 및 분리 거리에 의한 효과로 해석할 수 있다.

먼저  $w$  ,  $\overline{w' T'}$  그리고  $\overline{w' m'}$  의 스펙트럼은 관성아범위(inertial subrange)에서 그 기울기가 각각  $-2/3$  (먹스펙트럼)와  $-4/3$  (코스펙트럼)으로 먹법칙(power law)을 만족한다. 따라서 선택된 자료의 품질에 큰 문제가 없음을 보여준다. 그러나 이와는 달리  $m$  의 스펙트럼은 고주파수 영역( $> 0.1$  Hz)에서 스펙트럼 밀도가 급격히 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 풍속이 매우 약했던 10:00-10:30 hrs 의 경우, 경로 길이와 기기간 분리 거리에 상관없이 모든 변수의 스펙트럼 밀도가 떨어져, 관성아범위에서 먹법칙을 만족하지 못하였다. 이러한 결과는 해당

관측지에서 주파수 반응 보정이  $\text{CH}_4$  플릭스 자료의 품질 관리에 있어 중요함을 보여준다.

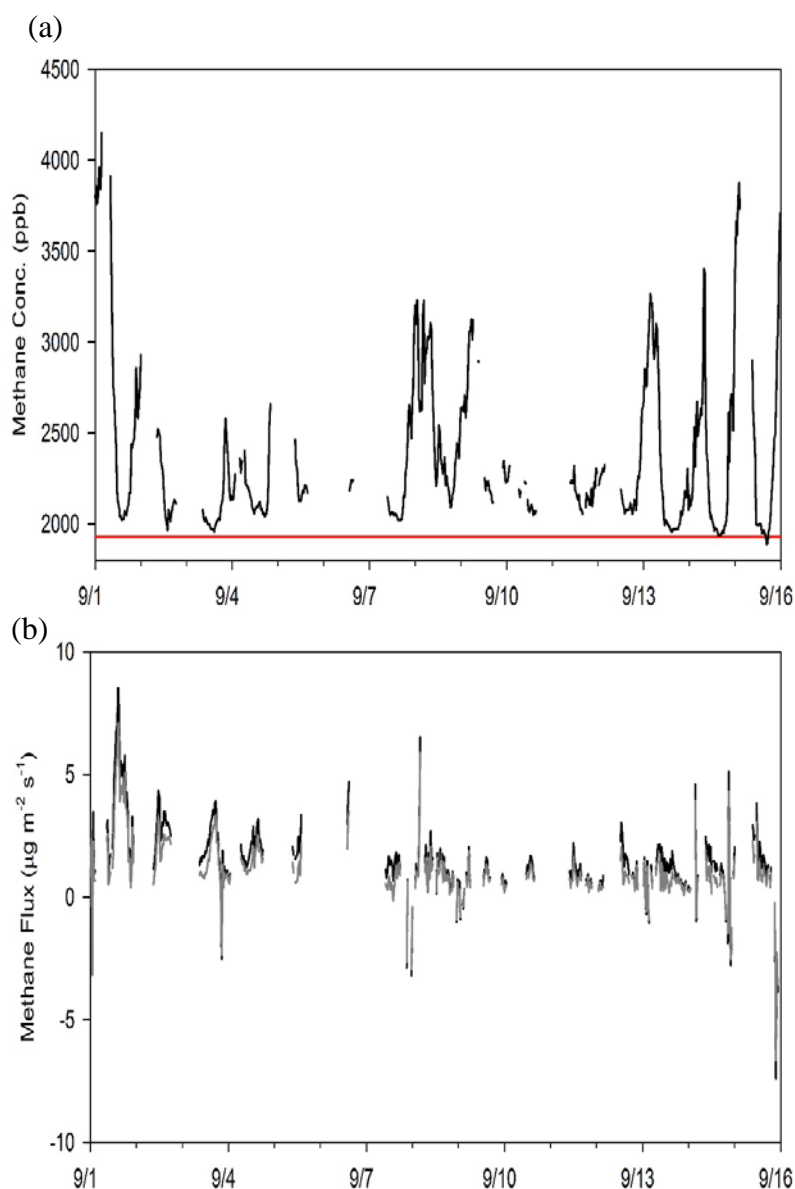


**Figure 11** (a) Normalized power spectra of vertical wind velocity,  $w$ , methane density,  $m$ , and air temperature,  $T$  and (b) normalized cospectra of covariances,  $\overline{w'c'}$  and  $\overline{w'T'}$  on 2 September 2011. Red lines mean gradient.



### 4.1.3 메탄 농도 및 플럭스 시계열

다음의 그림(Fig. 12)은  $\text{CH}_4$  농도의 시계열과 플럭스를 보여준다. 기간 동안의 평균  $\text{CH}_4$  농도는 2,365 ppb 로 2011 년 배경대기 농도인 1,929 ppb 에 비해 높았다(KMA, 2012). 최대  $\text{CH}_4$  농도는 4,150 ppb 였고 최대값이 관측된 시간은 9 월 1 일 새벽 3 시 30 분경이었다. 최종  $\text{CH}_4$  플럭스는 보정 전 플럭스에 비해 주간(07:00~19:00)에는 평균 30 %, 야간(19:00~07:00)에는 평균 18 % 이었다(Fig. 7). 최종 보정된  $\text{CH}_4$  플럭스는 음의 값을 제외하면  $0.1 \sim 8.5 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$  의 범위를 보였다. 관측 기간 중에 일부 음의  $\text{CH}_4$  플럭스가 관측되었는데, 대부분 늦은 저녁과 새벽 시간으로 바람이 매우 약한 환경(풍속  $1 \text{ m s}^{-1}$  이하)에서 관측되었다.



**Figure 12** Daily variation of (a) methane concentration and (b) methane flux. The bottom red line represents the background concentration ( $\sim 1,929$  ppb) measured by Korea Meteorological Administration. Gray line represents the raw methane flux which is not applied correction.

#### 4.1.4 메탄 플럭스의 보정 결과

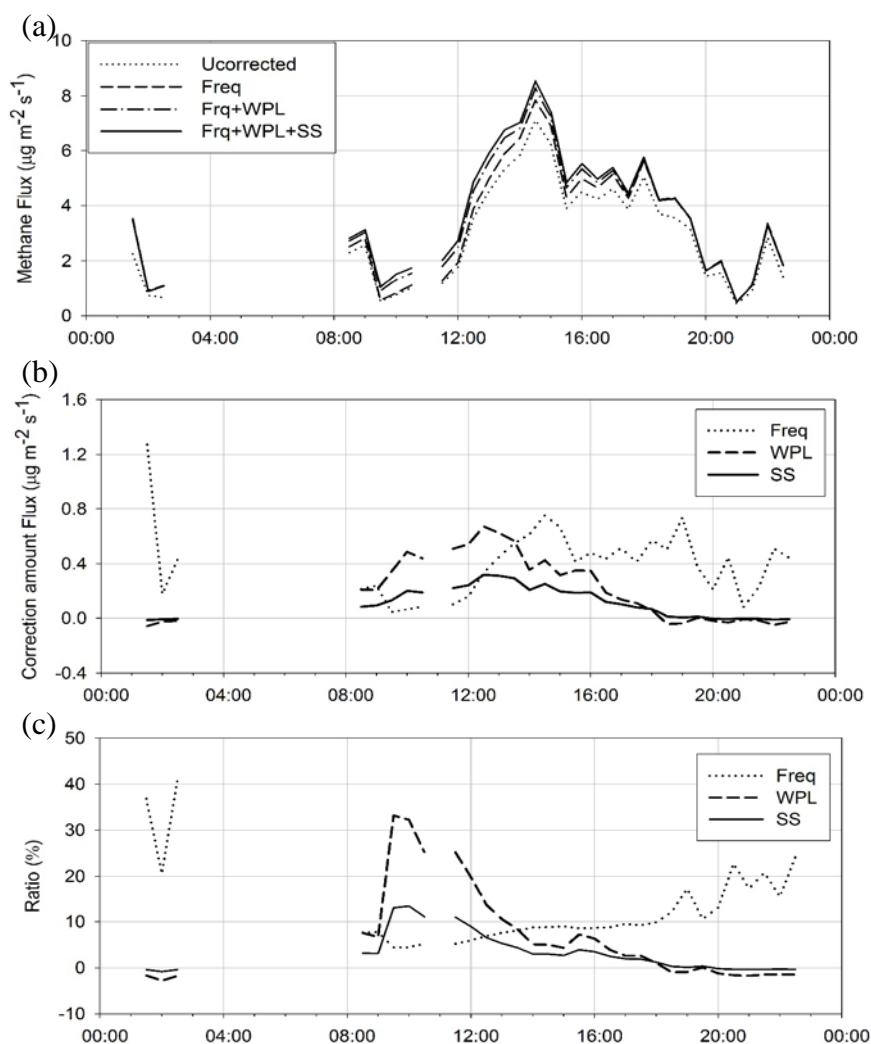
보정의 각 단계가 최종 플럭스 값에 기여하는 상대적인 영향을 알아보았다. 날씨가 맑고(주간 순복사 평균  $490 \text{ W m}^{-2}$  이상)  $\text{CH}_4$  자료 획득률이 좋은 날(65 %) 하루를(9 월 1 일)을 택하여 보정 단계별로  $\text{CH}_4$  플럭스의 24 시간 시계열을 Fig 13 에 나타내었다.

전체 보정단계에서 주파수 반응 보정이 가장 컸다(Figure 4, solid lines). 그 효과는 주간과 야간으로 나누었을 때, 최종 플럭스의 평균 8 %와 24 % 이었다. 앞서 언급된 바와 같이, 식(3)에 따라 주파수 보정은 기기간의 분리 거리, 풍속에 의해 영향을 받으며 주파수 영역에 따라 다르게 나타난다. 따라서 주간과 야간의 보정 효과의 차이는 야간의 약한 풍속( $1 \text{ m s}^{-2}$  이하)에 기인함을 알 수 있다. 이러한 결과는 야간 최대 25%의 보정 영향을 보이게 된다(Figure 4c).

공기 밀도 보정은 현열과 잠열에 의해 영향을 받기 때문에 야간보다 주간에 그 영향이 크다(Webb *et al.*, 1980; Iwata *et al* 2014). 주간의 경우 최종 플럭스 대비 평균 10 %의 보정효과를 보이는 반면, 야간에는 평균 -2 %의 효과를 보였다(Figure 4, dash-dot lines). 공기 밀도 보정은 현열 플럭스와 잠열 플럭스에 의해 영향을 받는다. 현열 플럭스와 잠열 플럭스는 야간에 비해

주간이 매우 크기 때문에(Figure 3) 주간에 보정 효과가 최대 34%의 영향을 가진다(Figure 4c).

분광 보정의 효과는 평균 3 % 였고, 공기 밀도 보정과 마찬가지로 야간보다 주간에 더 크게 나타났다(Figure 4c, dotted lines). 앞서 2.3.4 에서 설명한 바와 같이 분광 보정은 기온과 압력으로 공기 밀도 보정식에 계수  $A$ ,  $B$ ,  $C$  를 곱해주는 형태이다(식 4, 식 5). 식에서 알 수 있듯이 분광 보정 효과는 공기밀도 보정의 변화를 따라가게 되는데 이러한 결과는 Figure 4b-c 에서 알 수 있다. 주간인 경우 최대 10%의 보정효과를 가지게 되는 반면 야간의 경우 보정의 효과가 거의 없다.



**Figure 13** Diurnal variations of (a)  $\text{CH}_4$  flux, (b) the amount of corrections, and (c) the ratio of individual correction to total flux prior to transplanting (1 Sep 2011)

## 4.2 프로세스 네트워크 분석 결과

### 4.2.1 정규 결합 형태

2011 년 period 3 기간동안의 김제의 논 생태수문계에 대한 정보흐름의 정규 결합형태는 다음과 같이 분류되었다(Figure 1).

Coupling 1-1(Figure 14a) 토양온도( $T_s$ )와 생태호흡(RE)의 관계에서 나타나고 있다. 두 변수는 매우 짧은 시간 규모에서 높은 상관관계( $I' = 21\%$ )을 보여주고 있지만 30 분이상의 시간에서 중요한 정보흐름이 없다. 토양 호흡은 일반적으로 토양 온도의 영향을 받는다고 알려져 있으며, 에디 공분산 관측에서 토양 호흡을 직접 측정하지 않는다면 관측된 이산화탄소 플럭스와 토양 온도를 이용하여 계산이 된다. 김제 자료의 경우, 반고셀 방법을 사용하여 토양호흡을 계산하였으므로 토양온도와 생태호흡이 상관 관계를 가지는 것은 예상된 결과이다.

Coupling 1-2(Figure 14b) 전천일사( $R_g$ )와 일차생산량(GPP)에서 나타나고 있다. 전천일사로부터 순생태교환량은 높은 상관관계( $I' = 21\%$ )를 보이고 있으면서 전천일사로부터 총일차생산량으로 유효한 정보흐름이 보여지고 있다. 총일차생산량의 경우 식생의 성장과 밀접한 관련이 있는데 일반적으로 전천일사가 높은 시기에 식생의 성장이 가장 최고를

이루기 때문에 전천일사와 총일차생산량이 상관관계가 높게 된다. 그러나 하루 내에서 전천일사의 경우 정오에 최대치를 이루지만 총일차생산량의 경우 그보다 늦은 시간에 최대치를 보이는데 이러한 지연시간이 정보흐름에서 Type 2로 나타나게 된다.

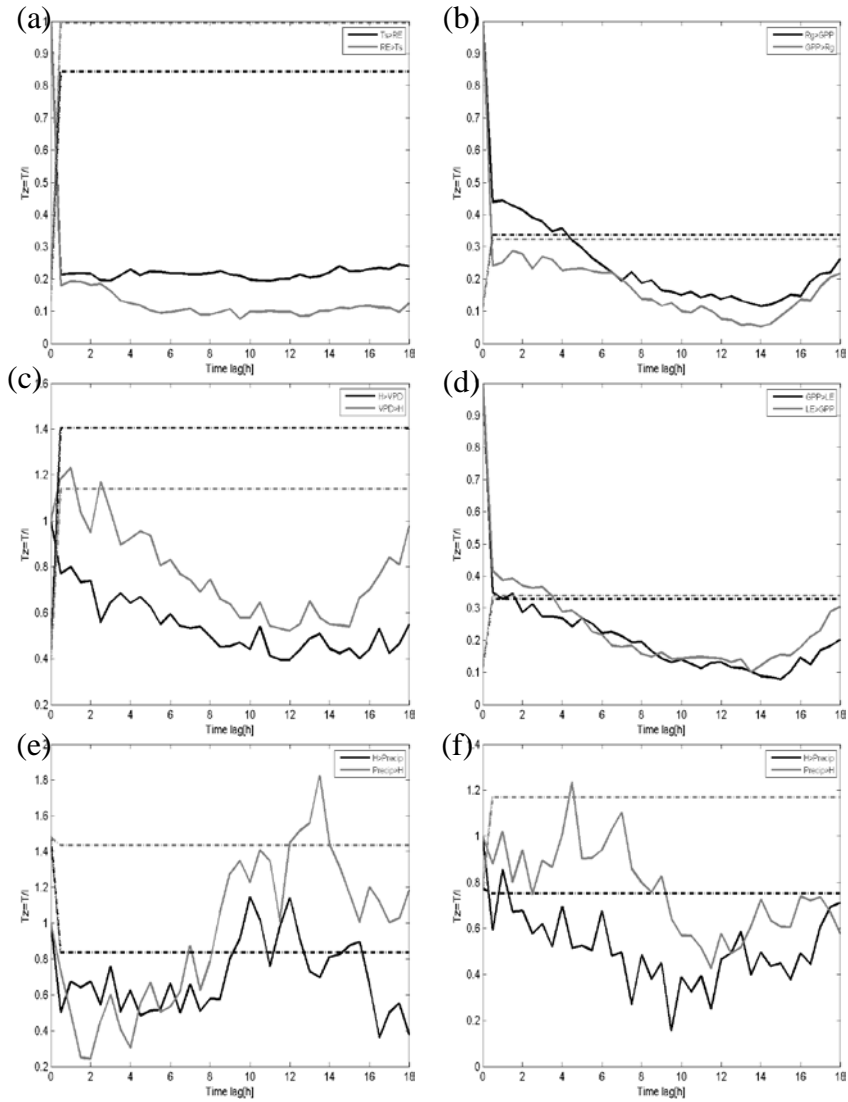
Coupling 1-3(Figure 14c) 현열(H)과 포차(VPD)는 낮은 상관관계( $I' = 6\%$ )를 보이고 있다. 이는 30 분이내의 시간규모에서의 정보공유가 30 분이상의 시간규모에서 나타나는 정보흐름에 비해 작은 것을 보여준다. 포차는 온도와 관계가 있고, 온도는 현열의 주용한 원천으로 이러한 관계가, Type 3의 정보흐름의 형태로 나타나게 된다.

Coupling 2-2(Figure 14d) 총일차생산량(GPP)과 잠열 플럭스(LE)는 높은 상관관계( $I' = 21\%$ )를 보이면서도 30 분이상의 시간규모에서 지속적인 정보흐름을 보이고 있으며, 이 방향은 쌍방향으로 작용하고 있다. Type 2-2 관계는 변수들이 자가조직화 한다는 것을 보여준다. 여기서 실제동기화(substantial synchronization)은 짧은 시간규모에서 피드백으로 정보가 교환이 되면서 생성된다(Ruddell and Kumar, 2009a). 생태계의 총일차생산량은 식생의 성장이 가장 활발한 시기에는 주로 광합성에 의해 형성이 되는데, 광합성 과정은 잠열에 중요한 원천인 증산과 매우 밀접한 관련이 있다.

Coupling 3-3(Figure 14e) 현열(H)과 강수(Precip)는 매우 낮은 상관관계( $I' = 1\%$ )를 보이고 있다. 그러나 11.5h-12h 시간 사이에 중요한 정보흐름이 나타나고 있으며, 이는 30 분이내에서 공유되는 정보양에 비해 상대적으로 매우 크다. 강수가 발생하였을 때, 지표와 대기간의 온도차이가 줄어들게 되고 이러한 영향이 현열에게 30 분 이후에도 지속적으로 정보흐름이 발생하게 하는 것으로 판단된다.

Period 3의 기간 동안에는 2-3의 결합관계는 나타나지 않았으나, period 4의 기간(Table 3)에 강수와 현열과의 관계에서 나타나는 것을 확인 할 수 있었다(Figure 1f). 정보흐름이 계가 다른 상황에서는 다른 결합 관계를 가질 수 있다는 점을 보여준다. 3-4, 4-4의 두 개의 결합관계는 이론적으로 가능하나 김제에서는 Ruddell and Kumar(2009a)와 동일하게 나타나지 않았다. 이 두 개의 관계는 한 방향으로의 정보흐름(3-4)이나 완전히 분리됨(4-4)을 의미한다. 상호정보는 서로 대칭이기 때문에 1-4와 2-4의 관계는 이론적으로 불가능하다.





**Figure 14** Canonical type of coupling about  $T_Z$  lag in Gimje rice paddy. Variables are given in the script. Solid lines are  $T_Z$  lags and dotted line are significance thresholds, above which information flux coupling is statistically significant. Y axis.

## 4.2.2 프로세스 네트워크 그림

Figure 15 는 3.3 에서 제안한 프로세스 네트워크 그리기의 일곱 단계를 따라서 도출된 실제 프로세스 네트워크의 결과이다. 각 단계별로 Table 5-8 에 제시된 네트워크 행렬의 정보를 사용하여 2011 년 7 월부터 11 월까지 벼 재배 기간 중의 생태수문계의 프로세스 네트워크 도출과정과 결과를 아래에 단계적으로 제시하였다.

(1) 하부계의 유무 확인: 먼저 동기화(Type 1)로 연결되는 제 1 하부계의 유무를 확인하기 위해 Table 5 에서 Threshold 값을 넘는 변수들의 쌍을 선택한다. 고려 대상 변수가 11 개이므로 총 121 개의 쌍이 주어진다. 그 중에서 대각선 상에 있는 자신과의 쌍 11 개를 제외한 110 개의 쌍에서, 대칭이기 때문에 그 반 쪽인 55 쌍을 대상으로 Threshold 값을 넘는 변수들의 쌍을 선택한다. 총 51 쌍이 이에 해당되고, Table 6 에서 기준값 ‘10’ 을 넘는 조건을 적용하고 나면 28 쌍이 남게 된다. 이제 남은 28 쌍중에서, Table 7 에서 Threshold 값을 넘지 못하는 쌍들, 즉 x 로 표시된 쌍들만을 선별하여 함께 묶으면  $T_a$ ,  $T_s$ ,  $P_a$ , VPD 그리고 RE 가 제 1 하부계를 구성한다. 또다른 결합 형태인 피드백 지배적(Type 2)으로 연결되는 제 2 하부계를 확인하기 위해서는, 먼저 Table 7 에서 Threshold 값을 넘어가는 변수들의 쌍들을 선택한다. 선택된 총 34 쌍 중에서 자기 자신을 제외한 변수 중 양방향의 값이 1 미만일

때의 변수들을 선택하면, 총 3 쌍이 이에 해당됨을 알 수 있다. 이를 통해 GPP, H 그리고 LE 가 한 하부계를 구성하게 된다.

(2) 하부계 구성 변수들의 그룹핑: 앞서 확인된 각 하부계 단위로 구성 변수들을 그룹으로 모아서 그림에 나타낸다. Fig. 15 에서 X 축은 시간 규모를, Y 축은 공간 규모를 나타내며 모두 로그 스케일로 주어져있다. 변수와 그룹들은 시간과 공간 규모를 고려하여 그래프 상에서의 위치를 정한다.  $T_a$ ,  $T_s$ ,  $P_a$ , VPD 그리고 RE 로 구성되는 제 1 하부계는 구성 변수들의 시간규모를 고려하여 Fig. 15 의 오른쪽 위에 나타낸다. GPP, H 그리고 LE 로 구성되는 제 2 하부계는 그 시간규모(0.5-2h)를 고려하여 Fig. 15 의 왼쪽 아래에 표기한다. 여기서  $R_g$ 와 Precip 는 서로간의 링크 및 시간 규모(4h)를 고려하여 Fig. 15 의 중심부 쪽에 표기를 한다.

(3) 하부계 내의 구성 변수간 링크 표시: 먼저, 확인된 제 1 과 2 하부계 내의 각 구성 변수들간의 결합 형태를 구분하여 링크를 표시한다. 제 1 하부계는 정보의 흐름이 관측 자료의 샘플링 간격인 30 분보다 짧은 시간 규모 내에서 발생하여 그 방향을 알 수 없으므로 구체적인 링크 표시 없이 그래프 상에서 원 안에 모여있는 모습으로 표현하였다. 반면에, 제 2 하부계는 Type 2 의 정보 흐름을 점선으로 이루어진 화살표로 나타내었고, 양 방향으로 표현하여 피드백 과정을 나타내었다.

(4) 하부계 간 링크 및 기타 링크 표시: 이제 제 1 하부계와 제 2 하부계 간의 링크를 표시하고, 두 하부계에 속하지 않는 변수들과의 모든 링크를 표시한다. 정보 흐름의 연결 형태와 방향은 앞서 표시한 방법을 따랐다. 먼저, 제 1 하부계에서 H 로의 Type 3 정보 흐름을 실선으로 표시하였고, 제 1 하부계가 LE 와 Type 1 으로 링크되어 있음을 실선으로 연결하되 양 끝을 점으로 표시하였다. 두 하부계 간 링크가 모두 표시되었으므로, 다음 단계인 기타 링크를 표시한다. 제 1 하부계의  $T_a$ , VPD 그리고 RE 가  $R_g$  와 Type 1 으로 링크되어있음을 실선으로 연결하였고 1 하부계에서 Precip 으로의 Type 2 정보 흐름을 표시하였다. 2 하부계가 각각 Precip 와 쌍방향으로 Type 3 의 정보교환이 있음을 표시하고  $R_g$  가 제 2 하부계로 Type 2 의 정보교환이 있음을 표시하였다. 마지막으로  $F_{CH_4}$  의 링크를 표시하였다. 제 1 하부계, 제 2 하부계 그리고  $R_g$  는  $F_{CH_4}$  로 Type 3 의 정보흐름을 표시하였고,  $F_{CH_4}$  는 GPP 와 Precip 로의 Type 3 의 정보흐름을 표시함으로써 모든 링크 표시를 마무리 하였다(Fig. 15).

(5) 피드백 고리로 연결되는 하부계들의 그룹핑: 이제는 두 하부계와  $R_g$ , Precip 그리고  $F_{CH_4}$  간에 Type 2 나 3 의 형태로 피드백 고리를 형성함으로써 또 다른 제 3 의 하부계를 구성하고 있는지를 확인해야 한다. Type 3 의 정보 흐름은 두 변수가 같은 하부계에 속해있지 않다는 것을 의미하나 Type 3 의 정보 흐름이

변수 나 하부계 간에 피드백 고리를 형성하는 경우 서로 링크되어 또 하나의 하부계를 조직하는 것으로 볼 수 있다(Ruddell and Kumar, 2009a). Figure 15 에서 제 1 하부계는 그러한 피드백 고리를 형성하지 않지만, 제 2 하부계와 Precip 이 Type 3 의 피드백 고리를 형성하고 있음을 볼 수 있다. 두 하부계가 합쳐진 제 3 하부계를 굵은 점선으로 그룹을 지어 나타내었다.

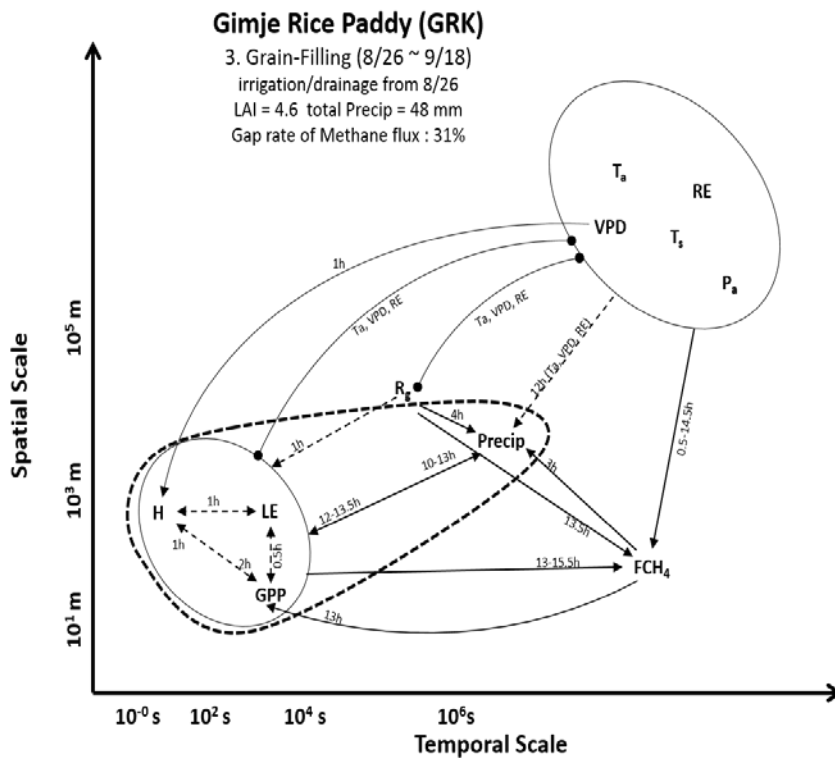
(6) 각 링크에 시간 지연 표시: 이제 모든 링크에 Table 8 에 주어진 시간 지연 정보를 표시한다. 변수간의 링크인 경우, 이산 엔트로피가 최대 일때의 시간 지연을 입력한다. 피드백 고리를 형성할 때는 정보 흐름의 방향의 화살표 부근에 시간 지연을 표기한다. 만약 시간 지연이 동일할 경우 선 가운데 표기를 한다. 하부계와 하부계 또는 하부계와 변수와의 링크의 경우, 하부계에 속한 변수들의 시간 지연의 최소값과 최대값을 표기한다. 예를 들어서, 제 1 하부계에서  $F_{CH_4}$  로 가는 정보 흐름의 시간 지연은 최소 0.5 시간에서 최대 14.5 시간으로 0.5–14.5h 로 표시하였다.

(7) 하부계의 명칭 부여: 각 하부계의 구성 변수들의 특성, 결합 형태, 시간 지연의 규모 등을 고려하여 각 하부계를 대표하는 명칭을 부여한다. 먼저 제 1 하부계의 경우, Ruddell and Kumar (2009a)는 중관기상 변수들로 구성된 이 그룹을 ‘중관 하부계(synoptic subsystem, SS)’ 로 명명하였는데, 본 연구에서도 같은 명칭을 사용하는 것이 적절하다. 여기서 주목해야 할 점은,

RE 는 생태계호흡을 나타내는 생물학적 변수로서 종관기상과는 관련이 없어 보이나, 직접 관측된 값이 아니라 실측에 기반을 둔 기온의 지수함수로 계산된 값이라는 점이다. 그 결과, 온도자료와 동기화되어 종관 하부계에 속하게 된 다소 인위적인 효과가 포함된 결과로 해석된다.

제 2 하부계의 경우는 Ruddell and Kumar (2009a)의 옥수수-콩밭 생태수문시스템의 프로세스 네트워크 결과를 살펴 볼 필요가 있다. 이 경우, Type 2 로 연결된 광합성 및 에너지 수지 관련 변수들의 그룹(예, GPP, H, LE)을 ‘난류 하부계(turbulent subsystem, TS)’ 로 명명하였다. 또한, Type 2 와 Type 3 이 혼재되어 결합된  $R_g$ , Precip 그리고 운량 등의 복사-구름-강수관련 과정의 변수들의 하부계를 ‘대기경계층 하부계(atmospheric boundary layer subsystem, ABLS)’ 로 명명하였다. Ruddell and Kumar (2009a)는 30 분 단위의 타워 자료가 가지는 공간 규모의 한계를 고려하여, ABLS 가 Type 3 으로 결합됨에도 불구하고 기본 하부계로 분류하였다. 위성자료와 같은 공간규모의 자료를 사용한다면 Type 2 로 결합된 명확한 ABLS 이 나올 수도 있을 것이다. 이 연구에서는 Type 2 로 연결된 그룹(GPP, H, LE)를 생물리화학 하부계(Biophysicochemical subsystem, BPS)으로 명명하였는데, 이는 탄소와 물의 순환을 모두 포함할수 있기 때문이다.

마지막으로, 제 3 하부계와 관련하여, Ruddell and Kumar (2009a)는 난류 하부계와 대기경계층 하부계가 피드백 고리로 결합되어 형성된 하부계를 지역 하부계(Regional subsystem, RS)라 명명하였다. 본 연구의 제 3 하부계의 구성 변수들이 Ruddell and Kumar (2009a)의 지역 하부계의 구성 변수와는 차이가 있는데,  $R_g$ 가 지역 하부계를 구성하지 못하고 있다.



**Figure 15** The process network for third period 2011, a grain filling state. Types 1, 2, and 3 relationships result in the interpretation of the system as two subsystems. Line arrow represent type 3 couplings, dot line represent type 2 coupling.

### 4.3. 프로세스 네트워크의 함축적 의미

그렇다면, 과연 이러한 프로세스 네트워크의 자기-조직화 과정을 주도하는 메커니즘은 무엇일까? 왜 그리고 언제 생태수문계는 피드백의 고리를 형성하여 자기-조직화된 과정과 구조를 만들어 내는 것일까? 네트워크의 조직화에 계절변화와 같은 특정한 패턴이 나타나는가? 어떠한 노드(변수)들이 정보의 발원 또는 흡원으로 작용하는 것일까? 본 연구에서 고려하지 않은 생태수문계에 관여하는 추가적인 생태학적 또는 사회학적 주요 변수는 무엇일까? 변수가 추가되었을 경우 프로세스 네트워크는 어떻게 달라질까? 이렇게 다양한 프로세스 네트워크의 변화 속에서 김제의 생태수문계는 과연 어떤 상태에 있다고 말할 수 있을까? 새로운 시각의 프로세스 네트워크 방법론은 통찰력과 해답을 제시하기도 하지만, 오히려 더 많은 질문을 자아내게 한다.

Table 9 은 위의 질문들과 관련하여 다양한 사고 실험과 추가적인 분석을 할 수 있도록 하기 위해, 2011 년 한 해 동안 다양한 식물계절학적, 수문학적 환경에서 김제의 논 생태수문계가 어떻게 하부계를 이루고 있고, 또 자기-조직화를 통해 하부계들의 집합체를 형성 또는 분리하는지를 5 개의 사례 기간을 통해 요약한 것이다. Period 1 은 모내기 이후 관개된 기간으로 상대적으로, 물질과 에너지의 흐름이 적어서 정보 흐름도 크지 않는 것으로



분석된다. Period 2 는 첫 배수 이후의 기간이었지만 장마기간이 겹쳐지게 되어 배수의 효과를 보기가 힘들어졌다. 이 시기에 난류 하부계가 나타났다. Period 3 은 관개와 배수를 번갈아 하는 기간으로서, 두 기간이 일부 중첩되어 있는데, 성장기간 중 엽면적지수가 최대에 도달한 시기이다. 이 시기에 지역하부계가 나타나고 있는 모습을 보이고 있다. Period 4 는 배수 이후 수확직전까지의 기간으로서 이전 기간과 비슷하게 지역하부계가 나타나고 있다. Period 5 는 벼 수확을 하고 식생이 없는 시기이다. 기본 하부계가 줄어들면서 하부계의 집합체로 나타나는 것을 볼 수 있다.

**Table 9** Phenology, hydrological conditions, plant area index (PAI), mean air temperature, gap-filling rate, and the presences of the basic and aggregated subsystems for five selected periods in 2011 in Gimje rice paddy site in Korea (GRK). Hydrological conditions are represented as total amount of rainfall (mm) / number of rainy days / maximum rain intensity (mm day<sup>-1</sup>). SS stands for synoptic subsystem, BPS biophysical subsystem, BPCS biophysicochemical subsystem, and RS regional subsystem.

	Period 1 1 Jul. ~ 24 Jul.	Period 2 25 Jul. ~ 18 Aug.	Period 3 26 Aug. ~ 18 Sep.	Period 4 26 Sep. ~ 15 Oct.	Period 5 27 Oct. ~ 19 Nov.
Phenology	Green up / Tillering	Peak Growth / Heading	Grain Filling	Senescence	Post-Harvest
Hydrological conditions	Monsoon period				
	352 / 16 / 114	306 / 17 / 216	48 / 5 / 23.5	17 / 3 / 6	39 / 10 / 18
PAI	0.2 ~ 1.4	1.4 ~ 3.5	4 ~ 4.6	4.6 ~ 5.4	No leaf
Temp.	25.9 °C	27.8 °C	24.6 °C	15.1 °C	13.4 °C
Events	Irrigated(6/19 - 7/24) Rainy periods(6/18-8/2)	Drainage(7/25 - 8/18) Rainy periods(6/18-8/2)	intermittent irrigated/drainage	Drainage (9/26) Harvest(10/20)	Barley(10/26)
Gaps rate	CO <sub>2</sub> 42 %, LE 42 %, H 42 % FCH <sub>4</sub> 80 %	CO <sub>2</sub> 14 %, LE 14 %, H 13 % FCH <sub>4</sub> 36 %	CO <sub>2</sub> 12 %, LE 12 %, H 11 % FCH <sub>4</sub> 31 %	CO <sub>2</sub> 3 %, LE 2 %, H 1 % FCH <sub>4</sub> 34 %	CO <sub>2</sub> 9 %, LE 9 %, H 9 % FCH <sub>4</sub> 39 %
Basic subsystem	<i>SS (Ta-VPD-RE-Ts-Pa)</i> <i>BPCS-a(H-GPP-FCH<sub>4</sub>)</i> <i>BPCS-b(LE-GPP-FCH<sub>4</sub>)</i>	<i>SS(Ta-VPD-RE-Ts-Pa)</i> <i>BPCS(H-LE-GPP)</i>	<i>SS(Ta-VPD-RE-Ts-Pa)</i> <i>BPCS(H-LE-GPP)</i>	<i>SS(Ta-VPD-RE-Ts-Pa)</i> <i>BPCS(H-LE-GPP)</i>	<i>SS(Ta-VPD-RE-Ts-Pa)</i> <i>BPS-a(H-Rg)</i> <i>BPS-b(LE-Rg)</i> <i>BPCS(GPP-Rg)</i>
Aggregated subsystem		<i>RS(H-LE-GPP-Rg)</i>	<i>RS(H-LE-GPP-Precip)</i>	<i>RS(H-LE-GPP-Precip)</i>	<i>RS-a(H-LE-GPP-Rg-Precip)</i> <i>RS-b(H-LE-GPP-FCH<sub>4</sub>)</i>

## 제 5 장 결론 및 요약

본 연구에서는 복잡계의 관점에서 생태계의 물질과 에너지와 정보의 흐름을 정량화하는데 제안된 프로세스 네트워크 연구방법을 소개하고 이 방법의 적용성을 사례분석을 통해 평가하기 위해 (1) 한국의 대표적인 농경지인 김제 논 관측지에서 에디 공분산 방법을 사용하여 에너지 및 물질 플럭스 관측, 특히  $\text{CH}_4$  플럭스 관측을 함께 수행하고 표준화된 자료 처리 과정을 통해 자료를 처리하였으며, (2) 처리된 결과를 이용하여 프로세스 네트워크 접근법에 따라 논 생태수문계에 대한 사례분석을 실시하였다.

관측 수행을 위해 최근에 상용화된 개회로 파장 변조 분광계를 사용하여 에디 공분산 방법으로 벼 생장 기간 동안  $\text{CH}_4$  플럭스를 연속 관측하였으며, 생산된 자료를 KoFlux 프로토콜에 따라 상용화된 EddyPro 프로그램을 사용하여 자료를 처리하였다. 이 후처리 과정에서 세 가지 주요 보정, 주파수 반응 보정, 공기 밀도 보정, 분광 보정의 효과를 정량화 하였다. 보정 효과는 밤과 낮에 따라 차이를 보였고, 보정 후에  $\text{CH}_4$  플럭스는 평균 18-30% 정도 증가하였다. 또한  $\text{CH}_4$  플럭스 자료의 결측 구간 메꾸기를 위한 표준화된 방법을 제안하였으며, 국가농림기상센터를 통해  $\text{CH}_4$  플럭스 보정과 빈 자료 메우기가 포함된 업데이트된 KoFlux 프로그램을 일반 사용자에게 제공할 예정이다. 관측 자료의 경우 그

결과가 자료 처리 방법에 상당히 의존적이므로 (Saigusa et al., 2013) 이를 통해 CH<sub>4</sub> 플럭스 관측을 수행하는 연구자들이 표준화된 방법을 통해 처리를 함으로써 보다 자료를 일관되고, 적절하게 고품질의 자료를 생산하는데 도움이 될 것이다.

단계별로 나누어 프로세스 네트워크 분석 방법을 제시하였으며, 각 과정마다 실례를 제시함으로써 연구자들이 적용하는데 있어 겪게 될 어려움을 줄이고 보다 쉽게 사용할 수 있게 하였다. 제시된 프로세스 네트워크 그리기의 결과는 생태수문계에 관여하는 다양한 시공간 규모의 과정들이 실제로 관련 변수들 간의 피드백과 정보 흐름의 망을 형성하고 있음을 명확히 보여준다. 또한 구성 변수들이 독특한 형태(즉, 차별화된 결합 형태, 방향성 및 시간 지연 규모)로 정보를 교환함으로써, 망 안에 또 다른 망을 형성하며 일관되게 조직화되어 특정한 하부계들을 구성하는 계층적 구조를 잘 나타낸다. 이러한 하부계들이 종관 하부계, 대기경계층 하부계, 생물리 하부계, 생물리화학 하부계 등으로 다양하게 나타남을 보여준다. 주목할 점은, 이러한 하부계들이 서로 피드백 고리들을 맺거나 끊음으로써 지역 하부계와 같은 새로운 하부계의 집합체를 생성하거나, 또는 분리시킨다는 것이다. 이러한 프로세스 네트워크 접근 방법을 통해 생태수문계가 변하는 과정을 시각화하여 나타냄으로써 외부 환경에 따라 적응해 나가는, 곧 자기-조직화하는 모습을 나타내었다.

프로세스 네트워크 접근 방법은 시간과 공간 규모가 다른 다양한 변수들간의 관계를 정보흐름으로 나타내준다. 이러한 정보흐름은 정량화를 통해 생태수문계를 이루는 변수들이 생산하는 정보량을 계산하고(Ruddell and Kumar 2009b) 이를 통해 자기-조직화를 유발하는 주요한 정보흐름을 찾아 낼 수 있을 것이다(Kumar 2010). 이러한 프로세스 네트워크 접근 방법의 결과는 생태수문 모델에 반영되어 보다 현실적인 결과를 나타낼 수 있을 것이다. 계의 변화로 인한 지속가능성에 대한 정보를 제공해줄 뿐만 아니라 모델을 다루는 연구자들에게 계의 상태가 변화하는 시기에 대한 기준점 또는 threshold 값에 대한 정보를 제공함으로써 보다 현실적인 모델 개발에 도움을 줄 것이다. 또한 단순히 생태수문계의 관계뿐만 아니라 사회적 변수들을 이용하여 보다 확장된 범위로 사회-생태수문계를 나타냄으로써 지속가능성에 대한 새로운 방법을 제시할 수 있을 것이다.

## References

Bae, Y. J., Bae, S. J., Seo, I. H., Seo, K., Lee, J. J., Kim, G. Y., 2013: Estimation of Uncertainty on Greenhouse Gas Emission in the Agriculture Sector. *Journal of Korean Society of Rural Planning*, 19, 4, 15–135

Baldocchi, D., 2003: Assessing the Eddy Covariance Technique for Evaluating Carbon Dioxide Exchange Rates of Ecosystems: Past, Present and Future. *Global Change Biology*, 9, 479–492.

Baldocchi, D.; Detto, M.; Sonnentag, O.; Verfaillie, J.; Teh, Y. A.; Silver, W.; Kelly, N. M., 2012: The Challenges of Measuring Methane Fluxes and Concentrations Over a Peatland Pasture. *Agricultural and Forest Meteorology*, 153, 177–187.

Baldocchi, D.; Falge, E.; Wilson, K., 2001: A Spectral Analysis of Biosphere–Atmosphere Trace Gas Flux Densities and Meteorological Variables Across Hour to Multi–Year Time Scales. *Agricultural and Forest Meteorology*, 107, 1–27.

Barabasi, A. L., 2002: *Linked: How everything is connected to everything else and what it means*. Plume Editors.

Bousquet, P.; Ciais, P.; Miller, J. B.; Dlugokencky, E. J.; Hauglustaine, D. A.; Prigent, C.; Van der Werf, G. R.; Peylin, P.;

Brunke, E. G.; Carouge, C.; et al., 2006: Contribution of Anthropogenic and Natural Sources to Atmospheric Methane Variability. *Nature*, 443, 439–443.

Burba, G., 2013: Eddy covariance method for scientific, industrial, agricultural and regulatory applications: A field book on measuring ecosystem gas exchange and areal emission rates. LI-COR Biosciences, Lincoln, NE, USA, 331.

Campbell Scientific Inc., 1998: Csat3 Three Dimensional Sonic Anemometer Instruction Manual.

Choi, T., J. Kim, and J. I. Yun, 1999: On Using the Eddy Covariance Method to Study the Interaction between Agro-Forest Ecosystems and the Atmosphere. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 1, 60–71. (in Korean with English abstract)

Dengel, S.; Zona, D.; Sachs, T.; Aurela, M.; Jammet, M.; Parmentier, F. J. W.; Oechel, W.; Vesala, T., 2013: Testing the Applicability of Neural Networks as a Gap-Filling Method Using CH<sub>4</sub> Flux Data From High Latitude Wetlands. *Biogeosciences*, 10, 8185–8200.

Finnigan, J. J.; Clement, R.; Malhi, Y.; Leuning, R.; Cleugh, H. A., 2003: A Re-Evaluation of Long-Term Flux Measurement

Techniques Part I: Averaging and Coordinate Rotation. Boundary–Layer Meteorology, 107, 1–48.

Forster, P.; Ramaswamy, V.; Artaxo, P.; Berntsen, T.; Betts, R.; Fahey, D. W.; Haywood, J.; Lean, J.; Lowe, D. C.; Myhre, G.; et al., 2007: Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. Chapter 2. In Climate Change 2007. The Physical Science Basis.

Hong, J., H. Kwon, J.–H. Lim, Y.–H. Byun, J. Lee, and J. Kim, 2009: Standardization of KoFlux Eddy–Covariance Data Processing. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology. 11, 1, 19–26. (in Korean with English abstract)

Iwata, H.; Kosugi, Y.; Ono, K.; Mano, M.; Sakabe, A.; Miyata, A.; Takahashi, K., 2014: Cross–Validation of Open–Path and Closed–Path Eddy–Covariance Techniques for Observing Methane Fluxes. Boundary–Layer Meteorology, 151, 95–118.

Jørgensen, S. E.; Fath, B.; Bastianoni, S.; Marques, J. C.; Muller, F.; Nielsen, S. N.; Patten, B. D.; Tiezzi, E.; Ulanowicz, R. E., 2011: A New Ecology: Systems Perspective; Elsevier

Kang, M., J. Kim, J.–H. Chun, and Y.–H. Kim, 2014a: Improvement and expansion of standardized KoFlux eddy covariance data processing. in preparation.



Kang N. K., Yun J., Talucder M. S. A., Moon M., Kang M., Shim K. M., Kim J., 2014b: Corrections on CH<sub>4</sub> fluxes measured in r rice paddy by eddy covariance method with an open-path wavelength modulation spectroscopy. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology, *in press*

Kim, J., S. B. Verma, N. Shurpali, Y. Harazono, A. Miyata, J.–I. Yun, B. Tanner, and J.–W. Kim, 2000: Diurnal and seasonal variations in CH<sub>4</sub> emission from various freshwater wetlands, Non-CO<sub>2</sub> Greenhouse Gases: Scientific nderstanding, Control and Implementation, J. van Ham et al. (Eds), Kluwer Academic Publishers, 131–136

Kim, J.; Guo, Q.; Baldocchi, D. D.; Leclerc, M. Y.; Xu, L.; Schmid, H. P., 2006: Upscaling Fluxes From Tower to Landscape: Overlaying Flux Footprints on High-Resolution (IKONOS) Images of Vegetation Cover. Agricultural and Forest Meteorology, 136, 132–146.

Knuth, K. H., 2005: Lattice Duality: the Origin of Probability and Entropy. Neurocomputing, 67, 245–274.

Korea Global Atmosphere Watch Center, 2012: Report of Global Atmosphere Watch. Korea Metrrological Admistration, 27pp.

Kumar, P., 2007: Variability, Feedback, and Cooperative Process Dynamics: Elements of a Unifying Hydrologic Theory. *Geography Compass*, 1, 1338–1360.

Kumar, P., Ruddell, B.L., 2010: Information Driven Ecohydrologic Self-Organization. *Entropy*, 12, 2085–2096

LI-COR Inc., 2013: LI-7700 Open Path CH<sub>4</sub> Analyzer Instruction Manual. LI-COR, 4647 Superior Street, Inc. Lincoln, NE, USA.

Massman, W. J., and J. P. Tuovinen, 2006: An Analysis and Implications of Alternative Methods of Deriving the Density (WPL) Terms for Eddy Covariance Flux Measurements. *Boundary-Layer Meteorology*, 121(2), 221–227.

McDermitt, D.; Burba, G.; Xu, L.; Anderson, T.; Komissarov, A.; Riensche, B.; Schedlbauer, J.; Starr, G.; Zona, D.; Oechel, W.; et al., 2011: A New Low-Power, Open-Path Instrument for Measuring Methane Flux by Eddy Covariance. *Applied Physics B*, 102, 391–405.

Meadows, D. H., 2008: *Thinking in Systems: a Primer*; Chelsea Green Publishing.

Min, S.-H., K.-M. Shim, Y.-S. Kim, M.-P. Jung, S.-C. Kim, and K.-H. So, 2013: Seasonal Variation of Carbon Dioxide and Energy Fluxes During the Rice Cropping Season at Rice-barley

Double Cropping Paddy Field of Gimje. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology, 15(4): 273–281. (in Korean with English abstract)

Mitchell, M., 2009: Complexity: a Guided Tour; Oxford University Press, USA.

Moncrieff, J. B.; Massheder, J. M.; De Bruin, H.; Elbers, J.; Friborg, T.; Heusinkveld, B.; Kabat, P.; Scott, S.; Soegaard, H.; Verhoef, A., 1997: A System to Measure Surface Fluxes of Momentum, Sensible Heat, Water Vapour and Carbon Dioxide. Journal of Hydrology, 188–189, 589–611.

Papale, D.; Reichstein, M.; Aubinet, M.; Canfora, E.; Bernhofer, C.; Kutsch, W.; Longdoz, B.; Rambal, S.; Valentini, R.; Vesala, T.; et al., 2006: Towards a Standardized Processing of Net Ecosystem Exchange Measured with Eddy Covariance Technique: Algorithms and Uncertainty Estimation. Biogeosciences, 3, 571–583.

Ruddell, B. L.; Brunsell, N. A.; Stoy, P., 2013: Applying Information Theory in the Geosciences to Quantify Process Uncertainty, Feedback, Scale. Eos, Transactions American Geophysical Union, 94, 56–56.

Ruddell, B. L.; Kumar, P., 2009a: Ecohydrologic Process Networks: 1. Identification. Water Resour. Res., 45, W03419.

Ruddell, B. L., Kumar, P., 2009b: Ecohydrologic process networks: 2. Analysis and characterization. *Water Resour. Res.* 45, W03420.

Saigusa, N., Li, S.-G., Kwon, H., Takagi, K., Zhang, L.-M., Ide, R., Ueyama, M., Asanuma, J., Choi, Y.-J., Chun, J.H., Han, S.-J., Hirano, T., Hirata, R., Kang, M., Kato, T., Kim, J., Li, Y.-N., Maeda, T., Miyata, A., Mizoguchi, Y., Murayama, S., Nakai, Y., Ohta, T., Saitoh, T.M., Wang, H.-M., Yu, G.-R., Zhang, Y.-P., Zhao, F.-H., 2012. Dataset of CarboEastAsia and uncertainties in the CO<sub>2</sub> budget evaluation caused by different data processing. *J For Res* 18, 41–48.

Schreiber, T., 2000: Measuring Information Transfer. *Phys. Rev. Lett.* 2000, 85, 461–464.

Shannon, C. E., 1948: A Mathematical Theory of Communication, 27, 379–423.

UNESCO International Hydrologicla Programme, 2004: Intergrated Watershed Management "Ecohydrological & Phytotechnology".

van Gorsel, E.; Leuning, R.; Cleugh, H. A.; Keith, H.; Kirschbaum, M. U. F.; Suni, T., 2008: Application of an Alternative Method to Derive Reliable Estimates of Nighttime Respiration From Eddy

Covariance Measurements in Moderately Complex Topography.  
Agricultural and Forest Meteorology, 148, 1174–1180.

Wassmann, R.; Neue, H. U.; Lantin, R. S.; Makarim, K.;  
Chareonsilp, N.; Buendia, L. V.; Rennenberg, H. 2000:  
Characterization of Methane Emissions From Rice Fields in Asia.  
II. Differences Among Irrigated, Rainfed, and Deepwater Rice.  
Nutrient Cycling in Agroecosystems, 58, 13–22.

Webb, E. K.; Pearman, G. I.; Leuning, R., 1980: Correction of Flux  
Measurements for Density Effects Due to Heat and Water Vapour  
Transfer. Q.J.R. Meteorol. Soc., 106, 85–100.

Wille, C.; Kutzbach, L.; SACHS, T.; WAGNER, D.; PFEIFFER, E. –  
M., 2008: Methane Emission From Siberian Arctic Polygonal  
Tundra: Eddy Covariance. Measurements and Modeling. Global  
Change Biology, 14, 1395–1408.

Yun, J.; Kang, M.; Kim, S.; Chun, J. H.; Cho, C.–H.; Kim, J., 2014a;  
How Is the Process Network Organized and When Does It Show  
Emergent Properties in a Forest Ecosystem? In Emergence,  
Complexity and Computation; Springer Berlin Heidelberg: Berlin,  
Heidelberg, 8, 307–317.

Yun, J. ; Kim, S.; Kang, M. ; Cho, C.H. ; Chun, J.H. ; Kim, J., 2014b:  
Process Networks of Ecohydrological Systems in a Temperate

Deciduous Forest: A Complex Systems Perspective. Korean  
Journal of Agricultural and Forest Meteorology, 16, 3, 157–  
168.(in Korean with English abstract)

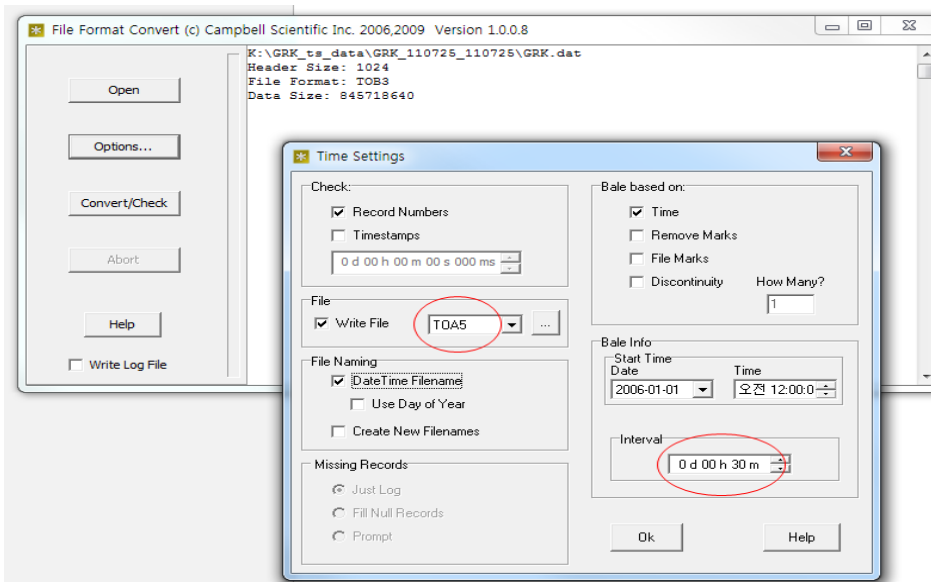
## 부 록

### A.1 EddyPro 를 이용한 메탄 자료의 처리

에디 공분산을 이용해 측정된  $\text{CH}_4$  플럭스의 10 Hz 자료로부터 30 분 자료를 계산하기 위해 Licor 에서 제공하는 상용 소프트웨어인 EddyPro (version 5)를 사용하였다. Eddypro 는 에디 공분산 관측의 계산에 사용되는 보정 과정을 체계적으로 제공하고 있으며, Window UI 로 사용하기에 매우 용이하며, 다양한 선택이 가능하다. 여기서는 EddyPro 를 사용하기 위한 입력 자료의 설정 방법과 EddyPro 내에서 보정 단계를 설정하는 방법에 대해 단계별로 설명하고자 한다.

### A.1.1 자료 변환

자료 집록기에서 관측된 10 Hz 자료는 Binary 형식으로 만들어지며 이를 Campbell Scientific 에서 제공하는 File Format converter 를 이용하여 ASCII 형태(TOA5)로 변환을 해준다. 자료의 간격은 30 분 간격으로 분할해 준다.





## A.1.2 관측지 설정

EddyPro 에 적용하기 전에 먼저 관측지의 기기 설정을 입력하여야 한다. 관측 높이, 각 기기별 분리거리, 자료의 형태에 대한 기본적인 정보를 입력하여야 한다. 김제 관측지의 경우 관측 시스템의 높이는 5.2 m, 관측 분리거리는 Li-7500 은 0.23 m, Li-7700 은 0.30 m, 연직거리 0.08 m 로 설정하였다. 자료를 처리하는 기간별 영면 변위를 구하기 위해 식생의 높이를 입력한다. 입력 자료의 형식은 TOA5 로 변환한 자료의 변수를 입력해준다.

The figure shows three screenshots of the EddyPro Metadata File Editor interface, illustrating the configuration steps for a measurement station.

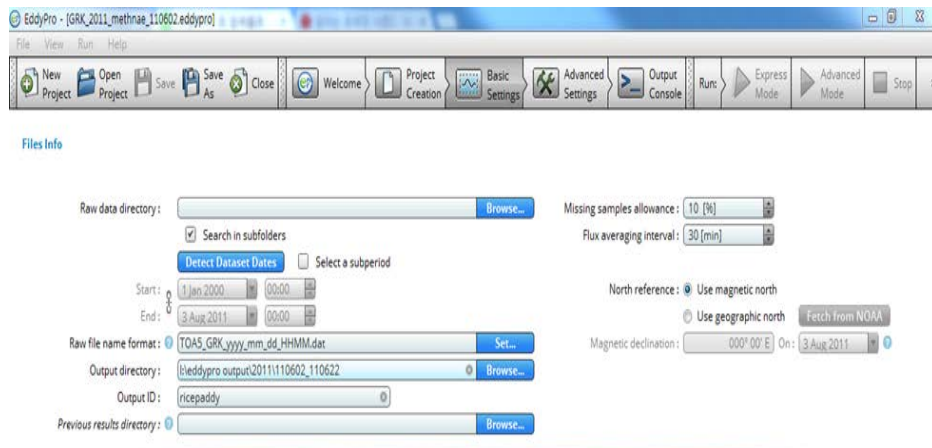
**Station Info Screenshot:** This window shows the 'Station' tab. It includes fields for 'File duration' (30 min), 'Acquisition frequency' (10,000 Hz), 'Canopy height' (0.60 m), 'Displacement height' (0.00 m), 'Roughness length' (0.00 m), 'Altitude' (21 m), 'Latitude' (35° 44' 42.400" N), and 'Longitude' (126° 51' 08.798" E).

**Anemometers Info Screenshot:** This window shows the 'Instruments' tab. It displays a table for 'Anemometers Info' with columns for 'Manufacturer', 'Model', 'Instrument ID', 'Height', 'Wind data format', 'North alignment', 'North offset', 'Northward separation', 'Eastward separation', 'Vertical separation', 'Longitudinal path length', 'Transversal path length', and 'Time response'. The table is populated with data for two instruments: 1 (Campbell Scientific, CSAT-3, CSSL, 5.20 m, U, V & W, N/A, 285.0 °, Reference, Reference) and 2 (LI-COR, LI-7500, LI-7700, 0.00 cm, 0.00 cm, 30.00 cm, 8.00 cm, 8.00 cm).

**Raw File Settings Screenshot:** This window shows the 'Raw File Description' tab. It displays a table for 'Data Columns Info' with columns for 'Ignore', 'Numeric', 'Variable', 'Instrument', 'Measurement type', 'Input unit', 'Linear scaling', 'Output unit', 'Gain value', 'Offset value', 'Nominal time lag', 'Minimum time lag', and 'Maximum time lag'. The table is populated with data for five instruments: 6 (Sonic 1: CSAT-3), 7 (Irga 1: LI-7500), 8 (Irga 1: LI-7500), 9 (Irga 2: LI-7700), and 10 (Irga 2: LI-7700).

### A.1.3 입/출력자료 입력

TOA5 로 변환된 입력 자료에 대한 정보와 입/출력 폴더에 대한 정보를 입력한다



## A.1.4 자료에 적용될 보정 설정

입력된 CH<sub>4</sub> 플럭스에 적용될 보정에 대해 설정한다. 적용될 보정은 좌표 변환, 공기 밀도 보정, 주파수 보정이다. EddyPro에서는 수증기 보정과 분광보정이 기본으로 포함되어 있어 별도로 설정해 주지 않아도 된다. 김제 관측지의 경우, 좌표 회전은 이중 회전을 적용하였다. 그러나 산악지형과 같은 복잡한 지형의 경우에는 평면 맞추기 회전을 사용하는 것이 좋다.

The screenshot displays the 'Raw Processing Options' and 'Spectral Correction Options' panels in the EddyPro software. The 'Raw data processing' section includes settings for wind speed measurement offsets (U, V, W), rotation method (Double rotation), detrend method (Block average), and time constant (250.0 s). The 'Compensation of density fluctuations (WPL terms)' section shows options for compensating density fluctuations and adding instrument sensible heat components. The 'Spectral Correction Options' section includes settings for low frequency range (Analytic correction of high-pass filtering effects) and high frequency range (Correction of low-pass filtering effects, Correction for instruments separation).

**Raw Processing Options**

Raw data processing

Wind speed measurement offsets

U: 0.000 [m/s] V: 0.000 [m/s] W: 0.000 [m/s]

Method: [ ]

☐ Angle-of-attack correction for wind components (Gill's only)

☒ Axis rotations for tilt correction

Rotation method: [Double rotation]

Turbulent fluctuations

Detrend method: [Block average]

Time constant: [250.0 [s]]

Time lag detection method: [Constant]

☐ Time lags compensation

Compensation of density fluctuations (WPL terms)

☒ Compensate density fluctuations

Method: [Webb et al. 1980 (open-path) / Ibrom et al. 2007 (closed-path)]

☐ Add instrument sensible heat components, only for Li-7500(A)

Surface temperature estimation: [Simple linear regressions]

**Spectral Correction Options**

Low frequency range

☒ Analytic correction of high-pass filtering effects (Moncrieff et al. 2004)

High frequency range

☒ Correction of low-pass filtering effects

Method: [Moncrieff et al. (1997) - Fully analytic]

☒ Correction for instruments separation

Method: [Hurst and Lenschow (2009), only crosswind and vertical]

☐ Spectral assessment file available

☒ Spectral assessment file not available

## A.1.5 출력파일 형식 결정

보정이 적용된 30 분 자료의 CH<sub>4</sub> 플럭스의 출력 파일 형태를 결정해준다. 출력물은 Fluxnet 에 제출하는 형식에 맞추어서 결과물이 나오게 할 수 있고, 역 스펙트럼 분석을 위해 스펙트럼 분석 결과를 포함시켜 나오게 할 수도 있다. 자료의 빈 구간의 경우 -9999 로 메워져서 나오게 설정을 하였다.

**Results files** ⓘ

☒ Full output (fluxes, quality flags, turbulence, statistics...)

Output format: ⓘ ☐ Output only available results  
☒ Use standard output format

Error label:

☐ AmeriFlux results (fluxes and more, formatted for AmeriFlux database)  
☐ GHG-Europe results (fluxes and more, formatted for GHG-Europe database)  
☐ Biomet measurements (averaged over the flux averaging period)  
☒ Details of steady state and developed turbulence tests (Foken et al. 2004)  
☐ Metadata

☒ Build continuous dataset (This is not g  
Missing flux averaging period are fille

---

**Spectral outputs** ⓘ

**Reduced spectra and ogives**

☒ All binned spectra and cospectra  
☒ All binned ogives  
☐ Ensemble averaged cospectra and models

**Full length spectra**

☒ U (longitudinal wind component)  
☒ V (transversal wind component)  
☒ W (vertical wind component)  
☒ T<sub>s</sub> (sonic or fast ambient temperature)  
☒ CO<sub>2</sub> (concentration or density)  
☒ H<sub>2</sub>O (concentration or density)  
☒ CH<sub>4</sub> (concentration or density)  
☒ 4<sup>th</sup> Gas (concentration or density)

**Full length cospectra**

☒ W/U  
☒ W/V  
☒ W/T<sub>s</sub>  
☒ W/CO<sub>2</sub>  
☒ W/H<sub>2</sub>O  
☒ W/CH<sub>4</sub>  
☒ W/4<sup>th</sup> Gas

Obtaining full spectra and cospectra will significantly increase the processing time.  
We recommend that you only check the boxes of those variables you really need.

## A.1.6 출력 결과 확인

출력되어 나온 30 분 자료는 CSV 파일 형식으로 나오며, 이를 엑셀과 같은 프로그램을 이용하여 확인 할 수 있다. 출력 변수들의 자세한 내용은 다음과 같다.

Label	Units, Format, or Range	Description
filename	-	Name of the raw file (or the first of a set) from which the dataset for the current averaging interval was extracted
date	yyyy-mm-dd	Date of the end of the averaging period
time	HH:MM	Time of the end of the averaging period
file_records	-	Number of valid records found in the raw file (or set of raw files)
used_records	-	Number of valid records used for current the averaging period
Tau	$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-2}$	Corrected momentum flux
qc_Tau	-	Quality flag for momentum flux
rand_err_Tau	$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-2}$	Random error for momentum flux, if selected
H	$\text{W m}^{-2}$	Corrected sensible heat flux
qc_H	-	Quality flag for sensible heat flux
rand_err_H	$\text{W m}^{-2}$	Random error for momentum flux, if selected
LE	$\text{W m}^{-2}$	Corrected latent heat flux
qc_LE	-	Quality flag latent heat flux
rand_err_LE	$\text{W m}^{-2}$	Random error for latent heat flux, if selected
gas_flux	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}(\dagger)$	Corrected gas flux
qc_gas_flux	-	Quality flag for gas flux

rand_err_gas_flux	$\mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}(\dagger)$	Random error for <i>gas</i> flux, if selected
H_strg	$\text{W m}^{-2}$	Estimate of storage sensible heat flux
LE_strg	$\text{W m}^{-2}$	Estimate of storage latent heat flux
gas_strg	$\mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}(\dagger)$	Estimate of storage <i>gas</i> flux
gas_v-adv	$\mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}(\dagger)$	Estimate of vertical advection flux
gas_molar_density	$\text{mmol m}^{-3}$	Measured or estimated molar density of <i>gas</i>
gas_mole_fraction	$\mu\text{mol mol}^{-1}(\dagger)$	Measured or estimated mole fraction of <i>gas</i>
gas_mixing_ratio	$\mu\text{mol mol}^{-1}(\dagger)$	Measured or estimated mixing ratio of <i>gas</i>
gas_time_lag	s	Time lag used to synchronize <i>gas</i> time series
gas_def_timelag	T/F	Flag: whether the reported time lag is the default (T) or calculated (F)
sonic_temperature	K	Mean temperature of ambient air as measured by the anemometer
air_temperature	K	Mean temperature of ambient air, either calculated from high frequency air temperature readings, or estimated from sonic temperature
air_pressure	Pa	Mean pressure of ambient air, either calculated from high frequency air pressure readings, or estimated based on site altitude (barometric pressure)
air_density	$\text{kg m}^{-3}$	Density of ambient air
air_heat_capactiy	$\text{J K}^{-1} \text{kg}^{-1}$	Specific heat at constant pressure of ambient air
air_molar_volume	$\text{m}^3 \text{mol}^{-1}$	Molar volume of ambient air
ET	$\text{mm hour}^{-1}$	Evapotranspiration flux
water_vapor_density	$\text{kg m}^{-3}$	Ambient mass density of water vapor
e	Pa	Ambient water vapor partial pressure

es	Pa	Ambient water vapor partial pressure at saturation
specific_humidity	kg kg <sup>-1</sup>	Ambient specific humidity on a mass basis
RH	%	Ambient relative humidity
VPD	Pa	Ambient water vapor pressure deficit
Tdew	K	Ambient dew point temperature
u_unrot	m s <sup>-1</sup>	Wind component along the <i>u</i> anemometer axis
v_unrot	m s <sup>-1</sup>	Wind component along the <i>v</i> anemometer axis
w_unrot	m s <sup>-1</sup>	Wind component along the <i>w</i> anemometer axis
u_rot	m s <sup>-1</sup>	Rotated <i>u</i> wind component (mean wind speed)
v_rot	m s <sup>-1</sup>	Rotated <i>v</i> wind component (should be zero)
w_rot	m s <sup>-1</sup>	Rotated <i>w</i> wind component (should be zero)
wind_speed	m s <sup>-1</sup>	mean wind speed
max_wind_speed	m s <sup>-1</sup>	Maximum instantaneous wind speed
wind_dir	° (degrees)	Direction from which the wind blows, with respect to Geographic or Magnetic north
yaw	° (degrees)	First rotation angle
pitch	° (degrees)	Second rotation angle
u*	m s <sup>-1</sup>	Friction velocity
TKE	m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	Turbulent kinetic energy
L	M	Monin-Obukov length
(z-d)/L	-	Monin-Obukhov stability parameter
bowen_ratio	-	Sensible heat flux to latent heat flux ratio
T*	K	Scaling temperature
un_Tau	kg m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup>	Uncorrected momentum flux

Tau_scf	-	Spectral correction factor for momentum flux
un_H	W m <sup>-2</sup>	Uncorrected sensible heat flux
H_scf	-	Spectral correction factor for sensible heat flux
un_LE	W m <sup>-2</sup>	Uncorrected latent heat flux
LE_scf	-	Spectral correction factor for latent heat flux
un_gas_flux	μmol s <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> (†)	Uncorrected gas flux
gas_scf	-	Spectral correction factor for gas flux
var_spikes	#	Number of spikes detected and eliminated for variable <i>var</i>
AGC	#	Mean value of AGC for LI-7500A and/or LI-7200, if present
RSSI	#	Mean value of RSSI for LI-7700, if present
var_var	-(†)	Variance of variable <i>var</i>
w/var_cov	-(†)	Covariance between <i>w</i> and variable <i>var</i>

† Concentrations and fluxes for water vapor are provided as [mmol mol<sup>-1</sup>] and [mmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>] respectively.

‡ Units depend on the nature of the variable.. Shorthand for variables in output files from EddyPro 5.



## A. 2 뒤는 자료 제거 프로그램

```
%-----  
-----  
  
% Program for processing flux data  
  
%  
  
% Record of revision  
  
% Date Programmer Description of change  
% -----  
-----  
  
% Dec/26/2010 Jinkyu Hong Original code  
% Jan/05/2010 Jinkyu Hong Add spike detection codes  
% Jan/13/2010 Jinkyu Hong Modify spike detection codes  
% Apr/16/2010 Jinkyu Hong Modify input file reading  
% Nov/07/2012 Minseok Kang Add ustar spike detection code;  
% Move iustar code to L2  
% May/15/2013 Minseok Kang Using stroage flux calculated  
% from stroage_flux.m  
% Nov/04/2014 Juyeol Yun Modify codes for GRK Methane  
%-----  
-----  
  
clear all  
clf('reset')  
clc  
  
  
fh=findall(0,'type','figure');  
for i=1:length(fh)  
    clf(fh(i));  
end
```

```

%%
%-----
-----

disp(' ')
disp('Spike Detection')
disp(' ')
disp(' ')
disp('Before running this program, ')
disp(' please make sure that you correctly set all parameters')
disp(' ')
disp(' ')

%% input data
[~,~,raw,dateNums] = xlsread('input_GRK.xlsx','Sheet1',...
'',',@convertSpreadsheetDates);
raw(cellfun(@(x) ~isempty(x) && isnumeric(x) && isnan(x),raw)) =
{'');

%% covert date to datenum
R      =      ~cellfun(@(isequalwithhequalnans,dateNums,raw)      &
cellfun('isclass',raw,'char'));
raw(R) = dateNums(R);

%% convert blank to NaN
R = cellfun(@(x) ~isnumeric(x) && ~islogical(x),raw);
raw(R) = {NaN};

%% output
inputdata = reshape([raw{:}],size(raw));

```

```

%% clear temporary variables
clearvars raw dateNums R;

%% divide Time and data

n=size(inputdata,1);
Time=inputdata(:,1);
x=inputdata(:,2:end);

%% Define constants for spike detection
cp

%-----
-----

thrsh = 7; % threshold for removing spike using median
%-----
-----

bad = -9999; % bad value
avgtime = 30; % averaging time (minutes)
nday = 28; % date processing period as the # of days (28 -> 28 days)
nnn = 48; % number of data points per day (48 -> 30 min avg time)

%-----
-----

lower_ch4 = 1.80; % lower limit of CH4 mole fraction. umol mol-1
upper_ch4 = 11.0; % upper limit of CH4 mole fraction umol mol-1

```

```

%% Parameters for plotting
startdate=datetime('8-1-2011');
enddate=datetime('8-5-2011');
xdata=linspace(startdate,enddate,5);

%% PROCESSING DATA
%-----

% Removing bad data
x=replace(x,bad,NaN);
ch4 = x(:,1);
Fch4sc = x(:,2);

%-----

n2 = nnn*nday;
navg = int8(n / n2);

for j = 1:1:2
for i = 2:1:n-1
d2(i,j) = (x(i,j)-x(i-1,j)) - (x(i+1,j)-x(i,j));
end
d2(1,j) = d2(2,j);
d2(n,j) = d2(n-1,j);
end

index = zeros(n,1);
index2 = zeros(n,1);

```

```

index3 = zeros(n,1);
nsp = zeros(navg,2);
nsp3 = zeros(navg,2);

%% Removig spikes in observed CH4 mole fraction and CO2 fluxes

for js = 1:1:navg % loop for segments
is = single(js-1)*n2+1;
isn = is+n2-1;
if(n/n2-single(js)<1.0)
isn = n;
end
%%
% Loop for different variables for Methane fluxes
for j = 1:1:2
clear d dd
d=d2(:,j);
Md = nanmedian(d);
MAD = nanmedian(abs(d-Md));
cr = thrsh./0.6745.*MAD;
for i = is:1:isn
if (d2(i,j)<Md-cr) || (d2(i,j)>Md+cr)
index3(i) = 1;
nsp3(js,j) = nsp3(js,j) + 1;
end
end
end
for i = is:1:isn
if(ch4(i)>=upper_ch4 || ch4(i)<lower_ch4)

```

```

index3(i) = 1;
end
if(index3(i)==1)
if(j==1)
ch4(i) = NaN;
elseif(j==2)
Fch4sc(i) = NaN;
end
end
end
end

clear xx

%-----
% plotting
%-----

figure(1)

subplot(212)
plot(Time, x(:,1),'-*k', Time,ch4,'or')
xlabel('Time (minutes)','fontsize',12)
ylabel('CH_{4} mole fraction','fontsize',12)
datetick('x','mm-dd','keeplimits')
set(gca,'XTick',xdata)
for i = 1:2
datetick(gca,'x','mm-dd','kepticks')

```

```

end

subplot(211)
plot(Time,x(:,2),'-*k',Time,Fch4sc,'or')
xlabel('Time (minutes)','fontsize',12)
ylabel('CH_{4} Flux (\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1})','fontsize',12)
datetick('x','mm-dd','keeplimits')
set(gca,'XTick',xdata)
for i = 1:2
    datetick(gca,'x','mm-dd','keepticks')
end

saveas(figure(1),strcat('CH4_',datestr(startdate,'yymmdd'),'.png'))

%-----
-----

```

### A.3 빈 자료 메우기 프로그램

```
%-----  
-----  
  
% Program for processing flux data  
  
%  
  
% Record of revision  
  
% Date Programmer Description of change  
% -----  
-----  
  
% Dec/26/2008 Jinkyu Hong Original code  
% Jan/13/2008 Jinkyu Hong CO2 flux gap filling using MDSM  
% Feb/10/2008 Jinkyu Hong LE gap filling using MDSM  
% Nov/23/2008 Jinkyu Hong Revision of the codes for E0_long  
% algorithm  
% May/21/2013 Minseok Kang Revision of van Gorsel method (data  
% selecting), add gap-filling code  
% for met data, add u* correction and  
% light response curve approach for  
% estimating nighttime respiration  
% Oct/16/2014 Juyeol Yun Modified codes for GRK Methane  
%-----  
-----  
  
clc  
  
clear all  
  
%-----  
-----  
  
%-----  
-----
```



```

%% input data
x=csvread('GRK_2012_Fch4_2.csv');
x=replace(x,-9999,nan);
re = x(:,1);
vpd = x(:,4);
ta = x(:,5);
rsdn = x(:,6);
press = x(:,7);
nee = x(:,8);
fch4 = x(:,9);
wd = x(:,2);
ws=x(:,11);
ts=x(:,3);
%-----
% Define constants and parameters for gap filling
%-----
-----

nday = 5; % date processing period (28 -> 28 days)
nnn = 48; % number of data points per day (48 -> 30 min avg time)
n2 = nnn*nday;
n = size(x,1); % total number of data to process
navg = int8(n/n2);
nday2 = 7;
avgtime = 24*60/nnn;
kk = 0;
%-----
-----
%-----
-----

x1 = ts;

```

```

x2 = nee;
x3 = press;
dx1 = 1.0;
dx11 = dx1;
dx2 = 0.5;
dx3 = 0.1;
% dpress1 = dpress; %hpa
wdd = [0, 60, 120, 180, 240, 300, 360]; % divide the wind direction
%-----
-----
%-----
-----

disp(' ')
disp('Gap-filling of fch4 (methane flux)')
disp(' ')
%-----
-----

clear y2 y3 index
fch4_filled = fch4;
for k=1:1:6 % loop for gap-filling of methane flux
for js = 1:1:navg
is = single(js-1)*n2+1;
isn = is+n2-1;
if(n/n2-single(js)<1.0)
isn = n;
end
clear y2 y3
disp(' ')
disp (js)
disp('Application of modified lookup neeble method')

```

```

disp(' ')
js = 1;
for i = is:1:isn
ii = 0;
if(isnan(fch4(i,1))==1)&&(wd(i,1)>=wdd(k))&&(wd(i,1)<wdd(k+1))
jj = 0;
while (ii<1)&&(jj<=4)
x1_f = x1(i);
x2_f = x2(i);
x3_f = x3(i);
i0 = i-jj*nday2*nnn;
i1 = i+jj*nday2*nnn;
if(i0<1)
i0 = 1;
i1 = 1+2*jj*nday2*nnn;
end
if(i1>n)
i0 = n-2*jj*nday2*nnn;
i1 = n;
if(i0<0)
i0 = 1;
end
end
ks = 0;
for j = i0:1:i1
if(abs(x3_f-x3(j))<dx3)&&...
(abs(x2_f-x2(j))<dx2)&&...
(abs(x1_f-x1(j))<dx1)&&...
(isnan(fch4(j))==0)&&...
(wd(j)>=wdd(k))&&...

```

```

(wd(j)<wdd(k+1))&&...
(isnan(fch4(j))==0)
ks = ks + 1;
y2(ks,1) = fch4(j);
y3(ks,1) = j;
y3(ks,2) = x3(j);
y3(ks,3) = x2(j);
y3(ks,4) = x1(j);
y3(ks,5) = ks;
end
end
ii = ks;
index(js,1) = i;
index(js,2) = i0;
index(js,3) = i1;
index(js,4) = ks;
index(js,5) = js;
js = js + 1;
if(ks>=1)
fch4_filled(i,1) = median(y2);
end
jj = jj + 1;
clear y2 y3
end
if(ii<1)
jj = 0;
while ii<1
x2_f = x2(i);
i0 = i-jj*nday2*nnn;
i1 = i+jj*nday2*nnn;

```

```

if(i0<1)
i0 = 1;
i1 = 1+2*jj*nday2*nnn;
end
if(i1>n)
i0 = n-2*jj*nday2*nnn;
i1 = n;
if(i0<0)
i0 = 1;
end
end
ks = 0;
for j = i0:1:i1
if(abs(x2_f-x2(j))<dx2) &&...
(wd(j)>=wdd(k))&&...
(wd(j)<wdd(k+1))&&...
(isnan(fch4(j))==0)
ks = ks + 1;
y2(ks,1) = fch4(j);
y3(ks,1) = j;
y3(ks,2) = x3(j);
y3(ks,3) = x2(j);
y3(ks,4) = x1(j);
y3(ks,5) = ks;
end
end
ii = ks;
index(js,1) = i;
index(js,2) = i0;
index(js,3) = i1;

```

```

index(js,4) = ks;
index(js,5) = js;
js = js + 1;
if(ks>=1)
fch4_filled(i,1) = median(y2);
dx1 = dx1/(kk+1);
kk =0;
end
if(j==n) &&...
(k==0)
kk = kk+1;
dx1=dx1+dx11;
jj = 0;
end
jj = jj + 1;
clear y2 y3
end
end
end
end
end
clear y2 y3 ks

%-----
-----

```

## Abstract

# ANALYSIS OF ECOHYDROLOGICAL COMPLEX SYSTEMS OF RICE PADDIES USING PROCESS NETWORK

Juyeol, Yun

Major in Rurla System Engineering

Department of Landscape Architecture and Rural Systems  
Engineering

The Graduate School

Seoul National University

From a complex systems perspective, ecohydrological systems in agricultural and forest ecosystems may be characterized with (1) large networks of components which give rise to complex collective behaviors, (2) sophisticated information processing, and (3) adaptation through self-organization and learning processes. In order to demonstrate such characteristics, we

applied the recently proposed ‘process networks’ approach to a rice paddy in Korea. The 30-minute averages of eddy fluxes of energy and matters were measured at 5.2m above a rice paddy along with other micrometeorological variables. In this analysis, we selected 11 variables which represent ecohydrologic system in a rice paddy: methane flux ( $F_{CH_4}$ ), gross primary productivity ( $GPP$ ), sensible heat flux ( $H$ ), latent heat flux ( $LE$ ), solar radiation ( $R_g$ ), precipitation ( $Precip$ ), ecosystem respiration ( $RE$ ), vapor pressure deficit ( $VPD$ ), air temperature ( $T$ ), soil temperature ( $T_s$ ), atmospheric pressure ( $P_a$ ). The process network analysis clearly delineated the ecohydrological system as the hierarchical networks of information flows and feedback loops with various time scales among different variables. Several subsystems were identified such as synoptic subsystem (SS), biophysical subsystem (BPS), and biophysicochemical subsystem (BPCS). These subsystems were assembled (or disassembled) through the couplings (or decouplings) of feedback loops to form (or deform) aggregated subsystem (e.g., regional subsystem, RS) – an evidence for self-organizing processes of a complex system. Our results imply that, despite natural and human disturbances, ecosystems grow and develop through self-organization, thereby continuously adapting to



environmental changes. Ecosystem integrity is preserved when the system' s self-organizing processes are preserved. Hence, from this perspective, the process networks approach will provide new insights towards sustainability.

**keywords :** process network, complex system, ecohydrological system, information theory, Feedback, self-organization, eddy covariance

*Student Nember* : 2011-23518